

P24717.P07



IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant : Dr. Berndt BRENNER et al

Appln No. : 10/757,419

Group Art Unit: Unknown

Filed : January 15, 2004

Examiner: Unknown

For : LIGHTWEIGHT STRUCTURAL COMPONENT IN PARTICULAR
FOR AIRCRAFT AND METHOD FOR ITS PRODUCTION

**SUPPLEMENTAL CLAIM OF PRIORITY
SUBMITTING CERTIFIED COPY**

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, Virginia 22313-1450

Sir:

Further to the Claim of Priority filed January 15, 2004 and as required by 37 C.F.R. 1.55, Applicant hereby submits a certified copy of the application upon which the right of priority is granted pursuant to 35 U.S.C. §119, i.e., of German Application No. 103 01 445.4, filed January 16, 2003.

Respectfully submitted,
Dr. Berndt BRENNER et al

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Neil F. Greenblum".

Neil F. Greenblum
Reg. No. ~~28,394~~ 35,913

April 15, 2004
GREENBLUM & BERNSTEIN, P.L.C.
1950 Roland Clarke Place
Reston, VA 20191
(703) 716-1191

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung



Aktenzeichen:

103 01 445.4

Anmeldetag:

16. Januar 2003

Anmelder/Inhaber:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V., 80636
München/DE

Bezeichnung:

Leichtbau-Strukturbauteil insbesondere für
Flugzeuge und Verfahren zu seiner Her-
stellung

IPC:

B 64 C, B 23 K



Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 20. Januar 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Klostermeyer


**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN
FORSCHUNG E. V.,
LEONRODSTRASSE 54, 80636 MÜNCHEN**

**LEICHTBAU – STRUKTURBAUTEIL INSBESONDERE FÜR FLUGZEUGE UND
VERFAHREN ZU SEINER HERSTELLUNG**


BESCHREIBUNG

Die Erfindung bezieht sich auf die Auslegung und Herstellung von Leichtbau – Strukturbauteilen. Objekte, bei denen ihre Anwendung zweckmäßig und möglich ist, sind alle großvolumigen Leichtbaustrukturen, bei denen ein wesentlicher Teil der Lastaufnahme als Flächenlast über Hautbleche erfolgt und die zur Lastverteilung, Lastableitung, Verminderung der Durchbiegung oder Verhinderung der Ausbeulung oder Ausknickung mit Versteifungselementen versehen sind. Typischerweise sind solche Beanspruchungsfälle besonders ausgeprägt in vielen Leichtbaustrukturen, die neben der Strukturbelastung mit einer Druckdifferenz zwischen der Außen- und der Innenseite des Hautbleches beaufschlagt sind. Besonders vorteilhaft ist die Erfindung für Flugzeugstrukturen, insbesondere für Rumpfstrukturen, aber auch Tragflächenstrukturen, Triebwerkseinläufe, Druckschotts, Fahrwerkschachtabdeckungen usw. einsetzbar. Weitere Einsatzfelder bestehen in Flüssigkeits- oder Gastanks, Druck- oder Vakuumbehältern, Bauteilen von Raketen und Raketentriebwerken sowie Rumpfstrukturen von Leichtbau-Wasserfahrzeugen.

Ohne die Einschränkung der Allgemeinheit soll der Stand der Technik und der Hintergrund der Erfindung beispielhaft am Aufbau von Flugzeugrumpfstrukturen erläutert werden. Üblicherweise sind Flugzeugrümpfe aus zusammengenieteten Hautfeldern hergestellt, die durch aufgenietete Versteifungselemente – jeweils längs der Rumpfröhre verlaufende Stringer und in Umfangsrichtung verlaufende Spanten – verstärkt werden. Typischerweise besteht ein Stringer aus einem geeignet ausgeformten Stringerkopf, einem Stringersteg und einem auf einem Hautfeldsockel aufliegenden, um 90° gegenüber dem Stringersteg abgewinkelten Stringersockel, der mit dem Hautfeldsockel vernietet wird.



Die Beanspruchung der Hautfeld-Versteifungselement-Struktur ist wegen der verschiedenen Lasteinleitungen und den von sehr vielen Parametern abhängenden statischen und zyklischen Lasten sehr komplex. Bei der Auslegung solcherart aufgebauter Flugzeugrumpfe müssen vorgegebene statische Festigkeitsanforderungen eingehalten, Dauerfestigkeiten berücksichtigt und die Sicherheit gegenüber verschiedenen vorgegebenen kritischen Versagensszenarien gewährleistet werden. In der Ausführung des Flugzeugrumpfes als genietete Struktur wird diesen Anforderungen durch die orts- und belastungsabhängige Wahl der Dicke von Hautfeld, Stringer, Spanten, der Form und dem Abstand von Stringern bzw. Spanten, der Abmaße von Hautfeldsockel und Nieten sowie Nietabstand u. v. a. m. Rechnung getragen. Nachteilig wirkt sich bei der Auslegung der konventionell genieteten Struktur aus, dass die bauweisenbezogenen Gewichtseinsparungspotenziale weitgehend erschöpft sind und die Herstellung einer solchen Differenzialstruktur durch die begrenzte Nietgeschwindigkeit zu aufwändig und zu dem kaum noch qualitativ verbesserungsfähig ist.




Bekannt ist [siehe P. Heider: „Lasergerechte Konstruktion und lasergerechte Fertigungsmittel zum Schweißen großformatiger Aluminium-Strukturbauteile“, in: VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 326, VDI-Verlag Düsseldorf (1994)], das Nieten durch ein beidseitig gleichzeitiges Verschweißen des Stringerfußes mit dem Hautfeldsockel mittels zweier Laser zu ersetzen. Um diese Verbindung mit einer ausreichend guten Ausbildung der Schweißnahtwurzel und porenarm zu realisieren, ist es erforderlich, dass beide Laserstrahlen ein gemeinsames Schmelzbad erzeugen. Das wird erreicht, indem beide Laserstrahlen, sich gegenüberliegend, auf identische Positionen in Bezug zum Füge Stoß fokussiert werden. Heißrisse werden dabei durch die Verwendung von geeigneten drahtförmigen Schweißzusatzwerkstoffen, wie z. B. Draht der Legierung AISi12, vermieden. Durch die sehr geringe Streckenenergie des Verfahrens und den zum Stringer symmetrischen Energieeintrag wird der Verzug begrenzt.

In einer weiteren Ausbildung dieses Prinzips ist der Aufbau komplett geschweißter Schalenbauteile, einschließlich Stringer, Spanten, Clips, Verteilungsgurten und Spantköpfen möglich [siehe: P. Brinck et al.: „Schalenbauteil für ein Flugzeug und Verfahren zur Herstellung“, PS DE 198 44 035 C1].

Trotz der gegenüber einer Nietverbindung besseren statischen Festigkeit und höheren Steifigkeit besteht der Nachteil einer solcherart hergestellten Verbindung in ihrer schlechteren Schadenstoleranz, was sich z. B. in einer höheren Rissfortschrittsgeschwindigkeit eines Umfangrisses nach Durchschreitung des Stringers sowie einer geringeren Restfestigkeit äußert. Die Ursache dafür besteht darin, dass sich ein Riss beim Erreichen eines angeschweißten Versteifungselementes in dieses hinein ausbreitet. Während bei einer konventionellen Differenzialbauweise durch die


aufgenieteten oder aufgeklebten Versteifungen, wie Stringer oder Spante, der Rissfortschritt in der Rumpfbepunktung verzögert wird, da die Risspitze sich für eine bestimmte Anzahl von Lastwechseln nicht in die Versteifungselemente ausbreitet und zudem durch die intakte Versteifung zusammen gehalten wird, setzt sich der Riss bei den angeschweißten Versteifungselementen gleichzeitig in der Bepunktung und dem Versteifungselement fort, ohne dass eine merkliche rissverzögernde Wirkung auftritt. Dadurch ist der gewichtssparende Einsatz laserstrahlgeschweißter Rumpfschalen nur für Rumpfbereiche möglich, für die nicht die Auslegungskriterien für Schadenstoleranz erfüllt werden müssen, d. h. nur für die Unterschalen des Rumpfes.



Die Ursache dieses Mangels liegt darin, dass die bekannte integrale Ausführung der Anbindung der Versteifungselemente keine ausreichenden geometrischen, belastungsmäßigen oder mikrostrukturellen Möglichkeiten für einen Rissstopp, eine schädigungsärmere Rissverzweigung oder eine Energiedissipation in Risspitzennähe bietet. Dadurch kann sich der Riss ungehindert in die Versteifungselemente ausbreiten.

Ein weiterer Mangel liegt darin, dass die Kopfbiegefestigkeit einer beidseitig gleichzeitig laserstrahlgeschweißten Stringer-Hautfeld-Anbindung mit zunehmender Schweißnahttiefe d. h. mit zunehmender Stringerdicke abnimmt.

Die Ursache dafür liegt u. a. darin, dass zur Erzeugung größerer Schweißnahttiefen die Schweißparameter so geändert werden müssen, dass eine größere Streckenenergie und ungünstigere Verhältnisse von Drahtfördergeschwindigkeit des Schweißzusatzwerkstoffes zu Schweißgeschwindigkeit gewählt werden müssen. Beides führt zusammen mit festkörpermechanischen Einflüssen zu einem größeren under-matching in der Schweißzone, einem breiteren überalterten Bereich in der Wärmeeinflusszone und zu einer verstärkten Gefahr der Bildung von Mikroheißrissen.



Zur Verbesserung des Rissfortschrittverhaltens von Schalenbauteilen mit angeschweißten Versteifungselementen ist bekannt geworden [siehe F. Palm: „Metallisches Schalenbauteil“, PS DE 199 24 909 C1], den Steg des Versteifungselementes in der Nähe der Schweißzone aufzudicken, ohne die Anbindungstiefe der beidseitig gleichzeitig ausgeführten Laserstrahlgeschweißnaht zu erhöhen. In weiteren Ausbildungen der Erfindung wird eine reduzierte Schweißnahttiefe oder das Einbringen von Einkerbungen zwischen Schweißnaht und Aufdickung ausgeführt. Alle drei Maßnahmen haben das Ziel, das Fortschreiten eines Risses in Richtung Stringerkopf zu erschweren. U. U. kann der Riss abgelenkt werden und eine gewisse Distanz in der Schweißnaht oder entlang der Schweißnaht laufen.

Nachteilig wirkt sich bei dieser Lösung aus, dass diese Ausführung nur auf den Belastungsfall Two-Bay-Crack, d. h. das Ertragen eines Längs- oder Umfangrisses über zwei Spantabschnitte oder Stringerteilungen hinweg zugeschnitten ist. Sowohl für den Belastungsfall „Zug in Richtung Kopf des Versteifungselementes“ wie er im unteren Rumpfbereich und für Spanten auftritt, als auch für die kombinierten Belastungsfälle „Biegung mit Biegepeil quer zum Versteifungselement“ und „Zug in Richtung Kopf des Versteifungselementes“, wie er im Schub-Druck belasteten Bereichen des Rumpfes vorkommt, führt

die vorgeschlagene Lösung zu einer Verringerung der ertragbaren Belastungen bzw. zu einem vorzeitigen Stringer- oder Spantabriss.

Die Ursache des Mangels liegt darin, dass den beiden Nachteilen einer integral geschweißten Struktur – das Fehlen eines effektiven Mechanismus zur Rissverzögerung und die lokal erhöhte Rissfortschrittsgeschwindigkeit in der Schweißnaht – nur mit nachteiligen Konsequenzen hinsichtlich der Belastbarkeit für andere Beanspruchungsfälle bzw. gar nicht begegnet wird.

Eine Ausbildung einer geschweißten Anordnung von Hautfeld und Verstärkungselementen, die eine Erhöhung der Restfestigkeit erreicht und somit auch den Einsatz von geschweißten Rumpfschalen für den Seiten- und Oberschalenbereich des Rumpfes ermöglichen soll, ist durch H. J. Schmidt [PS DE 100 31 510 A1] bekannt geworden. Dazu werden vor dem Laserstahlschweißen Verstärkungen an den Versteifungselementen angebracht. Die Verstärkungen können dabei als Doppler oder als Zugbänder angeordnet sein.

Die Doppler bestehen aus hochfesten Al-Legierungen oder faserverstärkten Metall-Laminaten und werden durch eine Nietverbindung oder eine Klebeverbindung aufgebracht. Die Doppler müssen damit einen ausreichenden, durch das Temperaturfeld des Schweißvorganges bestimmten Abstand zur Schweißnaht haben. Die Zugbänder bestehen aus hochfesten Stahl- bzw. Titanlegierungen oder Faserverbundwerkstoffen und werden in vorher einzubringende Durchgangsbohrungen eingebracht und verdrillt. Zur Aufnahme der Durchgangsbohrungen sind Querschnittsverstärkungen im unteren Stegbereich des Versteifungselementes vorgesehen. Eine weitere Variante sieht vor, den unteren Stegbereich geschlitzt auszuführen, das Zugband durch eine Aufnahmeöffnung in den geschlitzten unteren Stegbereich einzuführen und das eingebrachte Zugband durch ein Zusammenpressen des geschlitzten Stegbereiches formschlüssig mit dem Zugband zu verbinden und anschließend in bekannter Art und Weise durch Laserstrahlschweißen mit dem Hautblech zu verbinden.

Durch die rissverzögernde Wirkung der Verstärkungen wird eine Erhöhung der Restfestigkeit erreicht. Das geschieht dadurch, dass die Zahl der nötigen Lastwechsel zum vollständigen Durchtrennen des Versteifungselementes erhöht wird und das Verstärkungselement erst später als das Versteifungselement versagt. Durch letzteren Einfluss kann das Verstärkungselement für den Zeitraum zwischen dem Versagen des Versteifungselementes und dem Versagen des Verstärkungselementes den Rissöffnungswinkel verkleinern und die Spannungen an der Risspitze reduzieren.



Die Ausbildung der Schweißnaht selbst wird gegenüber dem vorher bekannten Stand der Technik nicht verändert. D. h. der Stringer- oder Spantfuß wird über seine gesamte Breite durch eine einzige Schweißnaht an das Hautblech angebunden, wobei die Schweißnaht durch beidseitig gleichzeitiges Laserstrahlschweißen erzeugt wird.

Ein Mangel der Anordnung besteht darin, dass sie nicht geeignet ist, den Stand der Technik hinsichtlich der beiden kritischen Belastungsfälle „Zug in Richtung Kopf des Versteifungselementes“ und „Biegung in Richtung quer zum Versteifungselement“ zu verbessern. Deshalb bleibt die Gefahr des statischen Versagens infolge der Ablösung des Versteifungselementes vom Hautfeld insbesondere bei Schub-Druck-Belastung in den Seitenschalen bestehen.

Die Ursache dafür besteht darin, dass durch die nicht geänderte Schweißnahtanordnung und –umgebung keine größeren Kopfbzug- oder Biegebelastungen quer zur Längsrichtungen der Versteifungselemente ertragen werden können.



Darüber hinaus wirkt sich nachteilig aus, dass die Verstärkungen der Versteifungselemente nicht die lokale Rissfortschrittsgeschwindigkeit in der Schweißnaht und deren unmittelbaren Umgebung reduzieren. Das gilt insbesondere für Belastungsfälle, wie z. B. Schub-Druck-Belastung, bei denen die Gefahr einer Rissausbreitung längs der Schweißnaht besteht.


Die Ursache dafür besteht darin, dass sie verfahrens- und anordnungsbedingt in einem Abstand zur Schweißnaht angebracht werden müssen, in dem ihre Wirkung auf eine Spannungsentlastung der Schweißnaht sehr gering ist.

Ein weiterer Mangel besteht darin, dass die Verstärkungselemente nicht wirtschaftlich an den Versteifungselementen auf- oder eingebracht werden können.

Die Ursache dafür liegt darin, dass zum Aufbringen der Verstärkungen zusätzliche Arbeitsschritte, wie z. B. das Aufnieten der Doppler, das Aufkleben der Doppler oder das


Bohren der sehr langen Durchgangsbohrungen nötig sind, die selbst sehr aufwändig bzw. zum Teil sogar aufwändiger sind, als das zu ersetzende Vernieten der Versteifungselemente mit dem Hautfeld.

Weiterhin wirkt sich nachteilig aus, dass die Variante mit eingelegten Zugbändern nicht für Spanten geeignet ist. Ursächlich liegt das in der Unmöglichkeit begründet, ein gekrümmtes Langloch zu bohren oder die beiden Schenkel des geschlitzten unteren Stegbereiches nach dem Einlegen des Zugbandes plastisch ohne Werkstoffschädigung oder verbleibenden Verzug des gesamten Versteifungselementes zusammenzubiegen.



Das Ziel der Erfindung ist es, ein neuartiges Leichtbau-Strukturbauteil insbesondere für Flugzeuge und ein Verfahren zu seiner effektiven und kostenreduzierten Herstellung anzugeben, das auch für komplexe Belastungsfälle geeignet ist, sowohl für geradlinige als auch gebogene Versteifungselemente anwendbar ist, eine verbesserte Schadenstoleranz, Kopfbzugfestigkeit, Schub-Druck-Belastbarkeit und Biegesteifigkeit aufweist, auch bei dickeren Versteifungselementen nutzbar ist und ohne aufwändige zusätzliche separate Arbeitsschritte auskommt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein Leichtbau-Strukturbauteil anzugeben, das trotz integraler Ausführung ein differenzielles Versagensverhalten aufweist, das zu reduzierten Belastungsspannungen und -dehnungen in der Fügezone und deren unmittelbarer Umgebung führt und das mit modernen Herstellungsverfahren einfach zu fertigen ist.




Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch eine neuartige Ausbildung eines Leichtbau-Strukturbauteiles wie in den Ansprüchen 1 und 30 ausgeführt sowie ein Verfahren zu seiner Herstellung wie in dem Anspruch 50 angegeben gelöst. Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Lösungen für das Leichtbau-Strukturbauteil sind in den Unteransprüchen 2 bis 29 und 31 bis 49 angegeben. Verfahrenstechnische Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen 51 bis 63 niedergelegt.

Dazu wird erfindungsgemäß im wesentlichen von den drei neuen Erkenntnissen Gebrauch gemacht, dass


- die nach dem Stand der Technik bekannten Ausführungsformen integraler Leichtbaustrukturen und hier insbesondere Flugzeug-Rumpfstrukturen infolge einer nicht schweißgerechten konstruktiven Auslegung die Möglichkeiten der Fügetechnik nicht ausreichend nutzen,

- es auch möglich ist, integrale Strukturen mit lokal wirksamen Elementen auszuführen, die die Schwachstelle Schweißnaht vermeiden und ein differenzielles Versagensbild erzeugen
- und dass ein ausreichend fehlerfreies Schweißen auch ohne ein beidseitiges gleichzeitiges Laserstrahlschweißen mit einem gemeinsamen Schmelzbad möglich ist, wenn neue Laserstrahlquellen mit höchster Strahlqualität und geeigneter, prozessangepasster Strahlformung (Twin-Spot oder elliptischer Strahl) sowie geeignete Schweißzusatzwerkstoffe verwendet werden.



Entsprechend dem Anspruch 1 besteht die erfindungsgemäße Lösung darin, dass der Steg des Versteifungselementes auf seiner dem Hautblech zugewandten Seite im Gegensatz zu allen bisherigen nach dem Stand der Technik bekannten Lösungen nicht aus einem Fuß, sondern aus zwei räumlich getrennten Schenkeln besteht, die beide mittels zweier getrennter Fügezonen stoffschlüssig mit dem Hautfeld verbunden sind. Diese Anordnung hat die Vorteile, dass bei gleichem Gewicht eine deutlich steifere Anordnung realisiert ist, die – verglichen mit der bisherigen Lösung – die mechanische Beanspruchung infolge Kopfzug und Biegung in den Schweißnähten reduziert, weniger empfindlich auf Schweißfehler reagiert und hinsichtlich der Anforderungen an die Führungsgenauigkeit der beiden Laserstrahlen zueinander weit weniger anspruchsvoll ist.

Für höhere Belastungen, so wie sie z. B. im Flugzeugbau normalerweise vorherrschen, wird, wie in Anspruch 2 beschrieben, das Hautfeld so ausgebildet, dass es im Bereich der Anschlussstellen der Fügezonen eine Aufdickung aufweist.



In den Ansprüchen 3 und 4 wird ausgeführt, dass die Versteifungselemente in der erfindungsgemäßen Ausbildung des Strukturbauteiles sowohl als Stringer oder auch als Spant ausgeführt werden können.

Der Erfindungsgedanke ist nicht darauf beschränkt, dass, so wie in Anspruch 5 ausgeführt, die Fügezone eine Laserschweißnaht sein muss. Genauso gut können, wie in den Ansprüchen 6 und 7 dargelegt, die Fügezonen auch aus Rührreibschweißzonen oder Klebezonen bestehen.

Anspruch 8 nutzt in vorteilhafter Weise die Erkenntnis aus, dass durch eine lokale Verdickung des Hautbleches – hier als Hautversteifungssockel ausgeführt – sich die Rissfortschrittsgeschwindigkeit im Belastungsfall „Umfangsriss unter gebrochenem Stringer“ während Durchschreiten des Stringers deutlich reduzieren lässt. Insbesondere wird durch die Stützwirkung des lokal verdickten Hautbleches die Belastung der Schweißnaht reduziert und die Rissfortschrittsgeschwindigkeit im ersten Schenkel reduziert. Darüber hinaus muss die nun geteilte Risspitze auf mehreren Pfaden größere

Wege zurücklegen, bis der zweite Stringerschenkel und der gesamte Stringersteg und -kopf durchtrennt sind.

Die Ansprüche 9 und 10 geben eine Lehre für eine vorteilhafte Auslegung der geometrischen Abmaße der Versteifungselement-Hautblech-Anordnung an.

Der Anspruch 11 bildet den Erfindungsgedanken nützlich für alle die Belastungsfälle weiter, in denen die Versteifungselemente außen angeordnet werden können. In diesem Fall wird die Schweißnaht nicht durch radiale Zugkräfte belastet. Durch die Rissverzweigung nach Durchschreiten der Schweißnaht wird die Rissfortschrittsgeschwindigkeit gegenüber dem Stand der Technik lokal verringert.

Der Erfindungsgedanke ist nicht allein darauf bezogen, dass die Köpfe der Versteifungselemente in klassischer L-Form ausgebildet werden. Ohne Verletzung des Erfindungsgedankens kann, wie in Anspruch 12 vermerkt, das Versteifungsprofil z. B. auch als U-Profil oder als ein einem U-Profil ähnliches Profil ausgebildet werden. In dieser Form lässt sich die Kopfseite des U-Profils besonders gut mit eventuell nötigen Anbauteilen verbinden. Die folgenden Ansprüche 13 bis 16 bilden die geometrische Form des Versteifungselementes für diesen Fall weiter aus.

Die Ansprüche 17 bis 21 führen eine neue zusätzliche Variante zur Verbesserung der Schadenstoleranz ein. Sie sehen die Anordnung von Durchbrüchen innerhalb der Schenkel des Versteifungselementes vor. Wenn ein laufender Riss in einen dieser Durchbrüche hineinläuft, kann er gestoppt werden. Die Ursache dafür besteht darin, dass der sehr hohe Spannungsintensitätsfaktor an der Risspitze nach Einmünden des Risses in den Durchbruch durch die niedrigere Kerbformzahl des Durchbruches ersetzt wird. Faktisch kommt das der Notwendigkeit eines Neustartes des Risses in einem Spannungsfeld mit einer geringeren Spannungsüberhöhung gleich.

Aus Experimenten ist bekannt, dass sich ein einmal gebildeter Primärriss unter den Belastungsbedingungen des Two-Bay-Crack-Kriteriums nur schwer aus seiner generellen Rissfortschrittsrichtung ablenken lässt. Dadurch kann es passieren, dass der Riss bei einer konventionellen Ausbildung des Stringers zwischen den beiden Durchbrüchen hindurch läuft und durch die lokal geringere Stützwirkung kurzfristig sogar beschleunigt wird. Dem trägt die versetzte Anordnung der Durchbrüche in den beiden Schenkeln, so wie in Anspruch 19 ausgeführt, Rechnung. Für den Unterrumpfbereich können diese Durchbrüche gleichzeitig vorteilhaft als Entwässerungsbohrungen genutzt werden.

Anspruch 22 trägt der Tatsache vorteilhaft Rechnung, dass in einem Flugzeugrumpf die Belastungsspannungen nicht homogen verteilt sind. So kann in besonders hoch belasteten Bereichen, durch das lokale Applizieren eines Dopplers, aus einem schadenstoleranten

faserverstärkten Laminat, die Rissfortschrittsgeschwindigkeit im Stringerfuß weiter verringert werden. Insbesondere für den Fall, dass das Versteifungselement ein Spant ist, kann auch die Abminderung der strukturellen statischen Belastbarkeit durch die Durchbrüche bei einer Zugbelastung auf den Spantsteg kompensiert werden.

Die Ansprüche 23 bis 26 erlauben einen neuen Ansatz zur Absenkung der Belastungsspannung in den Fügezonen. Im Bereich der Rumpfoberschalen unterliegen die Fügezonen einer hohen Zugspannung, die durch direkt in ihrer Nähe angeordnete Zugentlastungselemente deutlich reduziert werden kann.

Die Ansprüche 27 und 28 nutzen in vorteilhafter Weise die Erkenntnis, dass Werkstoffanhäufungen besonders effektiv den Rissfortschritt im Hautfeld verringern können, wenn sie sich in unmittelbarer Nähe des Hautfeldes befinden. Zur Vermeidung der Ausknickung tragen sie wegen ihres geringeren Widerstandsmomentes weniger bei, reichen aber aus, um den Abstand der Versteifungselemente etwas vergrößern zu können und damit summarisch Gewicht einzusparen. Darüber hinaus sind sie im Stande, das akustische Verhalten des Rumpfes zu verbessern.

Anspruch 29 setzt die Erkenntnis um, dass bei asymmetrisch zur Längsachse der Versteifungselemente angeordneten Köpfen die Versteifungselemente sowohl bei Zug- als auch bei Druck- oder Schub-Druck-Belastung sich quer zu ihrer Längsrichtung verbiegen und damit hohe Biegespannungen in der Schweißnaht erzeugen.

Im Anspruch 30 wird eine Anordnung für ein Leichtbau-Strukturbauteil angegeben, bei der sich im Hohlraum, der durch die beiden Schenkel des Versteifungselementes und dem Hautblech gebildet wird, ein Verstärkungselement befindet, das aus einem Werkstoff mit einem deutlich höheren E-Modul als das Hautblech und die Versteifungselemente besteht und das mit mindestens einem der Partner-Versteifungselement bzw. Hautblech form- und / oder kraftschlüssig verbunden ist. Bei einer Dehnung des Hautfeldes in Richtung der Längsachse der Versteifungselemente reduziert die kraft- und / oder formschlüssige Verbindung zwischen Verstärkungselement und Versteifungselement bzw. Hautblech die Dehnung im Fußbereich des Versteifungselementes und damit in den Fügezonen. Dadurch werden die beiden Schweißnähte soweit entlastet, dass sich, trotz einer den Rissfortschritt begünstigenden Mikrostruktur in der Schweißzone, eine lokal verringerte Rissfortschrittsgeschwindigkeit ergibt. Da die Dauerfestigkeit der nicht angerissenen Verstärkungselemente sehr viel größer ist als die Spannung für Rissausbreitung im Hautblech und Versteifungselement, bleibt das Verstärkungselement auch noch intakt, wenn der Riss die beiden Schenkel der Versteifungselemente und den Hautfeldversteifungssockel durchschritten hat. Neben der verringerten Rissfortschrittsgeschwindigkeit wird auch die Restfestigkeit erhöht. Im Vergleich zum

Stand der Technik wirkt sich positiv aus, dass das Verstärkungselement sich in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht befindet und damit die Spannungsintensität bei Annäherung des Risses an die Fügestelle zwischen Hautfeld und Verstärkungselement effektiv reduzieren kann. Damit ist die erfindungsgemäße Anordnung der Verstärkungselemente geeignet, Nachteile einer integralen Struktur hinsichtlich Schadenstoleranz zu vermeiden bzw. zu verringern.

Die Ansprüche 31 bis 49 geben vorteilhafte Ausgestaltungen des Anspruches 30 an.

Anspruch 50 beschreibt die wesentlichsten Verfahrensschritte zur Herstellung des erfindungsgemäßen Leichtbau-Strukturbauteiles. Die Ansprüche 51 und 52 beziehen sich auf die Nutzung des Laserstrahlschweißens als die günstigste Verfahrensvariante. Im Anspruch 51 wird von der Erfahrung Gebrauch gemacht, dass sich die Entstehung von Schweißfehlern (Poren, Auswürfe) beim Laserstrahlschweißen von Aluminium durch eine geeignete Strahlformung reduzieren lässt.

Der Erfindungsgedanke erlaubt es weiterhin, dass das Fügen, so wie in den Ansprüchen 53 und 54 dargestellt, durch ein Rührreibschweißen oder Kleben erfolgt.

Im Anspruch 55 wird durch das beidseitig gleichzeitig erfolgende Fügen eine Taktzeit sparende Variante des Verfahrens angegeben. Wie jedoch im Anspruch 56 ausgeführt wird, ist es entgegen bisheriger Annahmen möglich, ausreichend fehlerfreie Schweißnähte auch mit einseitig nacheinander geschweißten und getrennt voneinander liegenden Schweißnähten zu erzeugen. Der dadurch möglich werdende Verzicht auf das beidseitig gleichzeitige Schweißen unter Bildung eines gemeinsamen Schmelzbades ermöglicht die konstruktiven Freiräume zur erfindungsgemäßen Ausgestaltung des Leichtbau-Strukturbauteiles sowie einen vereinfachten Verfahrensablauf.

Die Ansprüche 57 bis 59 geben Verfahren an, mit denen sich die erfindungsgemäßen Verstärkungselemente besonders günstig spanlos mechanisch fertigen lassen. In Anspruch 57 wird das Strangpressen als ein sehr preiswertes Verfahren benutzt, um die Verstärkungselemente einschließlich ihrer Stege herzustellen. Wird das Verstärkungselement als Spant ausgebildet, ergibt sich die Schwierigkeit, dass er im Fall z. B. eines Flugzeugrumpfes bogenförmig ausgeführt sein muss. Solche bogenförmigen Halbzeuge lassen sich auch sehr günstig – so wie in Anspruch 58 ausgeführt – herstellen, wenn während des Strangpressens gleich hinter dem Strangpresswerkzeug eine Querkraft auf das Halbzeug ausgeübt wird. Wenn die Höhe des Verstärkungselementes im Verhältnis zu seiner Dicke zu groß ist, ist es nach Anspruch 59 günstiger, die beiden Schenkel durch einen Spalten mittels Drückwalzen zu erzeugen.

Ein wesentlicher Verfahrensschritt stellt die Herstellung der kraft- und / oder formschlüssigen Verbindung zwischen Versteifungselement und / oder Hautblech mit dem Verstärkungselement dar. Die Ansprüche 60 bis 63 legen dazu günstige Varianten dar.

Die Erfindung wird an den nachfolgenden Ausführungsbeispielen näher erläutert. Sie werden anhand der Fig. 1 bis 11 näher beschrieben. In den Figuren sind gleiche Merkmale mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Es zeigt:



- Fig. 1** einen Querschnitt eines Leichtbau-Strukturbauteiles in einer ersten, besonders einfach zu fertigenden Ausführungsform,
- Fig. 2** einen Querschnitt eines erfindungsgemäßen Strukturbauteiles für erhöhte Anforderungen hinsichtlich Schadenstoleranz,
- Fig. 3** einen Vergleich der Biegebelastungen in einer laserstrahlgeschweißten Stringer-Haut-Verbindung nach dem Stand der Technik mit der erfindungsgemäßen Stringer-Haut-Verbindung,
- Fig. 4** eine alternative Ausführungsform für die Gestaltung von Stringern oder Spanten mit integrierten Rissstoppnern,
- Fig. 5** einen Querschnitt durch eine Stringer-Haut-Verbindung, die durch ein eingelegtes Verstärkungselement für höchste Anforderungen hinsichtlich Schub-Druck-Belastbarkeit, Schadenstoleranz und Restfestigkeit ausgebildet ist,
- Fig. 6** einen Querschnitt der höchstbelastbaren Stringer-Haut-Verbindung in einer zweiten Ausführungsform,
- Fig. 7** einen Querschnitt einer höchstbelastbaren Stringer-Haut-Verbindung in einer dritten Ausführungsform,
- Fig. 8** einen Querschnitt durch eine Ausführungsform mit zusätzlichen Elementen zur Versteifung des Hautfeldes,



- Fig. 9** den Querschnitt einer Ausführungsform, bei dem das Versteifungselement als U-Profil ausgeführt ist,
- Fig. 10** den Querschnitt einer Ausführungsform, bei der sich in unmittelbarer Nähe der beiden Schweißzonen innerhalb des Hautbleches drahtförmige Zugentlastungselemente befinden,
- Fig. 11** den Querschnitt mit einem drahtseilförmigen Zugentlastungselement direkt unterhalb des Hautfeldversteifungssockels.

Ausführungsbeispiele

Beispiel 1:

Der Unterrumpf eines Flugzeuges soll mit einer höheren Beulstabilität und einer verbesserten Steifigkeit ausgeführt werden. Gleichzeitig sollen die Herstellungskosten und das Gewicht reduziert werden. Dazu wird von einer genieteten auf eine laserstrahlgeschweißte Konstruktion in einer erfindungsgemäßen Konfiguration übergegangen, wie sie in Fig. 1 für die Variante Stringer-Hautfeld dargestellt ist. Das Beispiel bezieht sich vorrangig auf die Ansprüche 1 bis 5, 50 bis 52 sowie 57 bis 59.

Das Hautfeld (1) weist einen Hautfeldsockel (11) auf. Ein im Stringerkopf (12) normal ausgeführter Stringer (2) weist auf seiner dem Hautblech zugewandten Seite zwei Schenkel (5, 6) auf. Die Unterseiten der beiden Schenkel (5, 6) verlaufen waagerecht und liegen somit eben auf dem ebenfalls ebenen Hautfeldsockel (11) auf. Beide Schenkel (5, 6) sind mit zwei getrennten Fügezonen (7, 8), deren Mittellinien einen Winkel von jeweils $\gamma = 20^\circ$ zur Oberfläche des Hautfeldsockels (11) bilden, stoffschlüssig mit dem Hautfeldsockel verbunden. Die Fügezonen (7, 8) werden durch Laserstrahlschweißen erzeugt. Die Summe der Tiefe der beiden Fügezonen entspricht der Stringerdicke d_s .

Für die Ausführung des Leichtbauelementes werden folgende Abmaße gewählt:

Hautfelddicke: $d_H = 1,6$ mm, Stringerhöhe: $h_s = 31,5$ mm, Dicke des Hautfeldsockels: $d_{HS} = 2,4$ mm, Breite des Hautfeldsockels: $b_{HA} = 23$ mm, Schenkellänge $s_s = 8,5$ mm, Stringerdicke $d_s = 3,3$ mm, Stringerkopfbreite: $b_s = 17,5$ mm, Schenkeldicke in der Ebene der Fügezone und Anbindungstiefe der Schweißnähte $t_s = 1,65$ mm, Winkel zwischen den beiden Schenkeln (5, 6) $\alpha = 40^\circ$, Abstand der Innenkanten der beiden Schenkel auf dem Hautfeldsockel $b_{rs} = 3,0$ mm. Sowohl Stringer als auch Hautfeld werden aus einem schweißbaren Al-Werkstoff, in diesem Fall aus der Legierung 6013 T4, gefertigt. Die Aufdickung (11) des Hautbleches (1) wird durch chemisches Fräsen aus dem Hautblech

herausgearbeitet: Die Stringer (2) werden einschließlich der Schenkel (5, 6) stranggepresst. Anschließend wird das Hautfeld (1) mittels einer Vakuumspannvorrichtung gespannt. Mittels einer in den Schweißkopf integrierten mitlaufenden Spanneinheit wird der Stringer (2) symmetrisch auf dem Hautfeldsockel (11) positioniert und durch Anlegen einer Kraft von etwa 20 kg auf das Hautfeld (1) gepresst. Durch seitliche Rollen wird verhindert, dass sich die Position der beiden Schenkel zueinander infolge der Druckkraft oder infolge seitlicher Kräfte, hervorgerufen durch das Ausrichten des Stringers auf dem Hautfeld, ändert.

Das Fügen erfolgt mit zwei CO₂-Lasern mit einer Leistung von jeweils 2 800 W. Zur Vermeidung von Heißrissen wird mit drahtförmigem Schweißzusatzwerkstoff der Legierung AlSi12 gearbeitet. Der Schweißdraht hat einen Durchmesser von 0,8 mm und wird mit einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 4 500 mm / min zugeführt. Die Schweißgeschwindigkeit beträgt 4 400 mm / min. Zur Minimierung des Verzuges wird beidseitig gleichzeitig geschweißt. Als Winkel γ zwischen Laserstrahlachse und Oberfläche des Hautfeldes (1) wird $\gamma = 20^\circ$ eingestellt.

Nach Meinung der Fachwelt [vgl. z. B. Heider „Lasergerechte Konstruktion und lasergerechte Fertigungsmittel zum Schweißen großformatiger Aluminium-Strukturbauteile“, in: VDI – Fortschrittsberichte, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 326, VDI – Verlag Düsseldorf (1994)] kann eine schweißfehlerarme (Heißrissigkeit, Porigkeit, Auswürfe) Stringer-Haut-Verbindung nur durch beidseitig-gleichzeitiges Schweißen bei Gewährleistung eines gemeinsamen Schmelzbades der beiden Laserstrahlen erzielt werden.

Neuere Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass sich rissfreie, porenarme und auswurffreie Schweißnähte auch mittels einer geeigneten Strahlformung des normalerweise kreisrunden Laserstrahlfokus erzielen lassen. Als besonders günstig hat sich die Teilung des Laserstrahles in zwei in Vorschubrichtung hintereinander liegende Strahlen herausgestellt. Zur Vermeidung von Auswürfen und der Verringerung der Porigkeit wird deshalb ein Twin-Spot-Spiegel angewandt. Als Abstand der Foki wird 0,3 mm bei einer Aufteilung der beiden Leistungsanteile im Verhältnis 60 : 40 bei einer Laserleistung von 3 500 W gewählt.

Nach Einstellen aller Parameter wird der Schweißprozess gestartet und die vorgesehene Fügelinie CNC-gesteuert unter Mitlaufen der Stringerspanneinheit abgefahren. Nach dem Schweißen wird das Panel auf den Zustand T6 warmausgelagert.

Mit bis auf Höhe und Kopf des Versteifungselementes (2) gleichen geometrischen Abmaßen können auch die Spanten ausgeführt werden. Hierbei ist zusätzlich zu beachten,

dass das Hautfeld mit einem Radius $R = 2\,820\text{ mm}$ gekrümmt ist. Das heißt, dass die Spanten so gekrümmt ausgeführt werden müssen, dass die Unterseite der beiden Schenkel (5, 6) eine Zylinderschale mit dem gleichen Radius beschreibt. Das wird realisiert, indem beim Strangpressen hinter dem Strangpresswerkzeug eine Querkraft in Richtung Spantkopf ausgeübt wird. Verfahrensmäßig läuft das Fügen der Spanten analog dem der Stringer ab.

Im Ergebnis dessen entsteht vorteilhaft und im Vergleich zum Nieten preisgünstiger, schneller und ohne Gewichtszuwachs, eine steifere und gegen Ausknickung sowie zyklische Druckbelastung resistenter Flugzeugrumpf-Unterschale.

In dieser einfachsten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Leichtbauelement auch gut für die Herstellung von steifen Aluminium-Rümpfen von Wasserfahrzeugen, insbesondere von Sport- und Rennbooten geeignet. Weitere sehr vorteilhafte Anwendungen sind Druck- und Vakuumbehälter.

Beispiel 2:

Weitere erfindungsgemäße Vorteile sollen an Hand einer weitergebildeten Ausführungsform erläutert werden, die zu deutlich besserem Schadenstoleranzverhalten führt. Sie ist besonders für den Seiten- aber auch Oberrumpfbereich, d. h. für Schub- Druck- und / oder Zugbelastung geeignet.

Eine bevorzugte geometrische Ausführungsform ist in Fig. 2 dargestellt. Zusätzlich zu den im Ausführungsbeispiel 1 genannten Merkmalen weist das Hautfeld (1) noch einen Hautfeldversteifungssockel (13) auf. Die beiden Außenseiten (16) des Hautfeldversteifungssockels (13) sind um den Winkel $\alpha / 2$ geneigt und passen sich damit den Innenseiten der

Schenkel (5, 6) an, die auch um den Winkel $\alpha / 2$ aus der Symmetrielinie hinaus geneigt sind. Die Fügeflächen 1 und 2 (9, 10) der beiden Schenkel (5, 6) sind um den Winkel $\beta \geq \alpha / 2$ gegenüber der Oberfläche des Hautfeldes (1) geneigt. Dadurch liegt die Schweißnaht bei einem Schweißnahtwinkel $\gamma \approx \beta$ senkrecht oder nahezu senkrecht zur Außenfläche der Schenkel (5, 6). Im Gegensatz zum Ausführungsbeispiel 1 sind hier die Schenkel zum Schenkelfuß hin verdickt ausgeführt, d. h. die Schenkeldicke in der Ebene der Fügezonen t_s ist größer als die Schenkeldicke b_{s0} in der Nähe des Verzweigungspunktes (14) der beiden Schenkel (5, 6).

Diese Stringer-Haut-Anbindung wird mit folgenden Abmaßen ausgelegt: Stringerhöhe $h_s = 37\text{ mm}$, Stringerkopfbreite $b_s = 21\text{ mm}$, Stringerdicke $d_s = 4,4\text{ mm}$, Dicke des Hautfeldes $d_H = 2,4\text{ mm}$, Dicke des Hautfeldsockels $d_{Hs} = 3,4\text{ mm}$, Dicke des Hautfeld-

Versteifungselementes (13) $d_{HV} = 5,0$ mm, Breite des Hautfeldsockels $b_{HS} = 15,2$ mm, Breite des Hautfeldversteifungssockels $b_{rs} = 9,2$ mm, Schenkeldicke in der Nähe des Verzweigungspunktes der beiden Schenkel $b_{so} = 2,2$ mm, Schenkelhöhe $s_s = 11,0$ mm, Schenkeldicke in der Ebene der Fügezone und gleichzeitig Anbindungstiefe der Schweißnaht $t_s = 2,7$ mm, Winkel zwischen den beiden Schenkeln $\alpha = 40^\circ$, Winkel zwischen der Fügefläche (7, 8) und dem Hautfeld $\beta = 22,0^\circ$, Radius im Verzweigungspunkt (14) $0,6$ mm.

Die Fertigungsschritte verlaufen bis auf die Herstellung des Hautfeldversteifungssockels (13) analog denen im Beispiel 1. Zur Gewährleistung einer passfähigen Anlage zwischen den Innenseiten der beiden Schenkel (5, 6) und den Seitenflächen des Hautfeldversteifungssockels (16) und den Fügeflächen (9, 10) wird diese Partie durch HSC-Fräsen an dem vorher durch chemisches Abtragen erzeugten Hautfeld (1) herausgearbeitet. Es ist aber auch möglich, auf das chemische Abtragen ganz zu verzichten und das gesamte Dickenprofil des Hautbleches (1) durch HSC-Fräsen herzustellen.

Als Schweißparameter werden folgende Werte gewählt: Laserleistung $2\,800$ W, Schweißgeschwindigkeit $4\,000$ mm / min, Drahtvorschubgeschwindigkeit $4\,000$ mm / min. Die Neigung der Laserstrahlachse zur Oberfläche des Hautfeldes wird entsprechend der Neigung der Fügeflächen auf $\gamma = 22,2^\circ$ eingestellt. Alle anderen Schweißparameter werden analog zu denen im Beispiel 1 gewählt.

Die so erzeugte Leichtbau-Rumpfschale weist besonders hohe Werte hinsichtlich Kopfbzugfestigkeit, Beul- und Knickstabilität sowie Schadenstoleranz auf.

Gegenüber der normalen beidseitig gleichzeitig laserstrahlgeschweißten Variante mit der gleichen Stringerdicke $d_s = 4,4$ mm steigt die Kopfbzugfestigkeit von etwa 230 MPa auf etwa 325 MPa. Darüber hinaus nimmt die Streubreite der ermittelten Kopfbzugwerte signifikant ab. Ungeachtet der höheren Kopfbzugwerte ist bei vergleichbaren Lasten die Werkstoffanstrengung in der erfindungsgemäßen Variante in der Schweißnahtebene wegen der von $4,4$ mm auf $2 \times 2,7$ mm = $5,4$ mm vergrößerte Anbindungsbreite geringer.

In diesem Fall sind folgende Verhältnisse nach Anspruch 10 realisiert: $t_s/d_s = 0,61$; $b_{so}/t_s = 0,81$; $s_s/h_s = 0,30$; $\beta = 22^\circ$. Für den Fall, dass auf eine nachfolgende Warmauslagerung verzichtet werden soll, kann auch die Schenkeldicke in der Ebene der Fügezone und Anbindungstiefe der Schweißnaht t_s auf $t_s = 4,9$ mm erhöht werden. Damit würde bei konstant gehaltenen übrigen geometrischen Parametern gelten: $t_s/d_s = 1,11$; $b_{so}/t_s = 0,45$.

Die Verbesserung hinsichtlich des Einsatzes in Schub-Druck belasteten Rumpfschalen wird in Fig. 3 erläutert. Durch die asymmetrische Ausführung der Stringer wirkt sowohl bei einer Zug-, als auch bei einer Druck- und besonders ausgeprägt bei einer Schub-Druck-Belastung ein Biegemoment M in Richtung des abgewinkelten Endes des Stringerkopfes (12) auf den Stringer ein (siehe Fig. 3 a). Der am höchsten beanspruchte Querschnitt liegt dabei in der Schweißnaht. Die mit dem Biegemoment verbundene Kraft F führt an der Schweißnahtoberfläche zu einer effektiven Biegespannung in Höhe von

$$\sigma_{\text{Beff}}^a = \frac{6 \cdot \alpha_{\text{KB}} \cdot F \cdot h_s}{L \cdot d_s^2} \quad (\text{I})$$

mit α_{KB} als Kerbformzahl für Biegung in der Position der Schweißnaht und L als Hautfeld- bzw. Stringerlänge.

In der erfindungsgemäßen Lösung dagegen liegt der am stärksten auf Biegung beanspruchte Querschnitt nicht mehr in der Schweißnaht selbst, sondern in der Ebene der Schenkelverzweigung (siehe Fig. 3 c). Wegen der veränderten Hebelverhältnisse und des im Vergleich zur Schweißnaht viel größeren Kerbradius sinkt die effektive Biegespannung im höchstbeanspruchten Bereich auf

$$\sigma_{\text{Beff}}^{c0} = \frac{6 \cdot \alpha_{\text{KB}}^r \cdot F \cdot (h_s - s_s)}{L \cdot d_s^2} \quad (\text{II})$$

mit α_{KB}^r als Kerbformzahl für Biegung am Ort der Schenkelverzweigung mit dem Radius r . Vergleicht man die Spannungen in den jeweils am höchsten auf Biegung belasteten Querschnitten, so ergibt folgender Abminderungsfaktor R_1 :

$$R_1 = \frac{\sigma_{\text{Beff}}^{c0}}{\sigma_{\text{Beff}}^a} = \frac{\alpha_{\text{KB}}^r \cdot (h_s - s_s)}{\alpha_{\text{KB}} \cdot h_s} \quad (\text{III})$$

Mit den oben angeführten Werten der geometrischen Abmessungen und $\alpha_{\text{KB}} \approx 3$, $\alpha_{\text{KB}}^r \approx 1,1$ resultiert ein Spannungsabminderungsfaktor $R_1 \approx 0,26$. D. h., dass die höchste

effektive Biegespannung durch die erfindungsgemäße Ausführung auf 26 % sinkt und sich zudem von der Schweißnaht in ein nicht mikrostrukturell geschädigtes Gebiet verlagert.

Die Biegebeanspruchung in der Schweißnaht wird infolge der Stützwirkung des unteren Schenkels in Fig. 3 c annähernd durch eine Zugbeanspruchung σ_{Zeff}^c in der Höhe von

$$\sigma_{\text{Zeff}}^c = \frac{\alpha_{\text{KZ}} * h_s * F}{s_s * t_s * L * \sin[2 * \arctan(b_{rs}/2 * s_s)]} \quad (\text{IV})$$

ersetzt (mit α_{KZ} als Kerbformzahl für Zugbelastung am Ort der Schweißnaht).

Analog dem Abminderungsfaktor R_1 kann auch ein Abminderungsfaktor für die Spannung in der Schweißnaht R_2 infolge des Wirkens des Biegemoments M definiert werden:


$$R_2 = \frac{\sigma_{\text{Zeff}}^c}{\sigma_{\text{Beff}}^a} \quad (\text{V})$$

$$R_2 = \frac{\alpha_{\text{KZ}} * d_s^2}{6 * \alpha_{\text{KB}} * s_s * t_s * \sin[2 * \arctan(b_{rs}/2 * s_s)]} \quad (\text{VI})$$


Mit den im Beispiel 2 ausgeführten Werten und $\alpha_{\text{KZ}} \approx \alpha_{\text{KB}}$ ergibt sich überschlagsmäßig $R_2 = 0,15$. Das heißt, dass mit der erfindungsgemäßen Lösung die aus der unsymmetrischen Gestaltung der Stringer herrührenden Biegemomente auf die Schweißnaht sehr gering sind und im Gegensatz zu der bisherigen Lösung eine Verschlechterung der Eigenschaften ausgeschlossen werden kann.

Zusammenfassend bedeutet das, dass die Werkstoffanstrengung infolge Druck-, Schub- oder Zugbelastung im kritischen Schweißnahtbereich abnimmt und dass damit laserstrahlgeschweißte Integralstrukturen auch für Seiten- und Oberschalen anwendbar sind.

Verglichen mit der erfindungsgemäßen Lösung sind andere Lösungen zur Absenkung der durch Biegung hervorgerufenen Werkstoffanstrengung, wie z. B. eine Aufdickung im Stringersteg oder die Verdickung des Stringerfußes entsprechend Fig. 3 b weit weniger effektiv. Wird z. B. nur der Stringerfuß verdickt, nimmt die Kopfbiegezugfestigkeit ab und die zwar reduzierte aber noch vorhandene Biegebelastung in der Schweißnaht reduziert die Belastbarkeit insbesondere bei Schub-Druck- oder Zugbelastung. Darüber hinaus wirkt sich nachteilig aus, dass zur Kompensation der Abminderung der Kopfbiegezugfestigkeiten deutlich größere Schweißnahttiefen benötigt werden, die zu einer Vergrößerung des Verzuges führen.



Im Belastungsfall „Rissfortschritt unter gebrochenem Stringer“ wirkt sich positiv aus, dass der Hautfeldversteifungssockel (13) in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht die Spannungsüberhöhung in der Rissspitzennähe reduziert. Damit unterliegt die Schweißnaht einer reduzierten Dehnungsamplitude, die zu einer lokal geringeren Rissfortschrittsgeschwindigkeit führt. Selbst nach dem Versagen der Schweißnaht im ersten Schenkel wird die Rissfortschrittsgeschwindigkeit durch die Rissverzweigung und die Werkstoffaufdickung im Hautblech reduziert. Wichtig ist darüber hinaus, dass der Stringer selbst nach Versagen der ersten Schweißnaht und des ersten Stringerschenkels seine stabilisierende Wirkung noch nicht verliert. Dadurch wird insgesamt eine verbesserte Schadenstoleranz und Restfestigkeit erreicht.



Weitere Vorteile bestehen hinsichtlich der Vermeidung von unbeabsichtigten Beschädigungen der Schweißnaht während der Montage der Rumpffpanels, beim Rumpffinnen-ausbau oder im Reparaturfall. Während z. B. bei einer nach dem Stand der Technik ausgeführten Versteifungselement-Haut-Anbindung eine unbeabsichtigte mechanische Belastung (z. B. durch Anstoßen während Montage) quer zum Versteifungselement (Spant oder Stringer) frühzeitig noch vor der Ausbildung irgendwelcher Hinweise am Versteifungselement (z. B. sichtbar bleibende Deformation) Risse in der Schweißnaht entstehen können, kann bei geeigneten Abmessungen des erfindungsgemäßen Versteifungselementes, die Ebene der Schenkelverzweigung als Sollverformungsstelle dienen, die anspricht, bevor in der Schweißnaht schädigende Spannungs- oder Deformationszustände erreicht werden.

Aus Sicht der Qualitätssicherung wirkt sich positiv aus, dass durch die getrennte Lage der Schweißnähte selbst maximale Querschnittsschwächungen, wie sie durch Auswürfe oder sehr lange Schlauchporen zustande kommen können, höchstens 50 % des Gesamtquerschnittes beider Schweißnähte erfassen können. Schweißtechnologisch wirkt sich sehr vorteilhaft aus, dass die Anforderungen zur Gewährleistung hochwertiger fehlerfreier Schweißnähte aus folgenden Gründen merklich reduziert werden:

- Die Foki der beiden Laserstrahlen müssen sich nicht mehr genau treffen. Das reduziert die Anforderungen an die Führungsgenauigkeit der Schweißanlage insbesondere beim Schweißen von nichtebenen Teilen.
- Bindefehler sind einfacher zu vermeiden, weil der Winkel zwischen Laserstrahlachse und der Fügefläche, der derzeit wegen der Abmessungen der Laserstrahlschweißköpfe nicht wesentlich unter 20° gesenkt werden kann, durch die jetzt mögliche Neigung der Fügeflächen auf 0° reduziert werden kann. Damit sinken auch die Anforderungen für die Führungsgenauigkeit des Laserstrahles senkrecht zur Vorschubrichtung und die Gefahr der Bildung von Bindefehlern nimmt ab.
- Durch den Wegfall der bisherigen Forderung nach einem Winkel zwischen Fügefläche und Laserstrahlachse sowie der daraus folgenden vorgegebenen minimalen Schweißnahtbreite kann mit einer geringeren Streckenenergie geschweißt werden, die den Verzug reduziert.
- Aus Sicht der Schweißtechnologie, der Schweißsicherheit und des Verzuges kann auf die Forderung des beidseitig gleichzeitigen Schweißens verzichtet werden.


Für noch höhere Anforderungen an die Schadenstoleranz können die beiden Schenkel (5, 6) wie in Fig. 4 a und 4 b in einer Seitenansicht gezeigt, mit Durchbrüchen versehen werden. Diese Durchbrüche wirken als Rissstopper, da ein in sie eindringender Riss zu seiner weiteren Ausbreitung erst einen neuen Riss initiieren muss. Form und Größe der Durchbrüche (15', 15'') sind dabei so gewählt, dass sie einen möglichst geringen Steifigkeitsverlust in Längsrichtung des Versteifungselementes nach sich ziehen, andererseits aber als effektiver Rissstopper für einen Riss wirken, der die Schweißnaht durchschritten hat. Die Form der Durchbrüche kann dabei kreisförmig, oval, als Langloch oder als abgerundetes Dreieck gewählt werden. Dabei sind die Durchbrüche (15', 15'') der beiden Schenkel (5, 6) jeweils versetzt zueinander angebracht. Dadurch wird schon bei einer geringen Abminderung der Steifigkeit des Versteifungselementes (2) abgesichert, dass der Riss in einem Durchbruch mündet und so die Schadenstoleranz steigt.

Beispiel 3:

Eine weitere Variante zur Verbesserung der Schadenstoleranz geschweißter Hautfeld-Stringer-Verbindungen wird in den Fig. 10 und 11 erläutert.

Im Oberschalenbereich herrschen längs der Schweißnähte bei einer Stringer-Haut-Anbindung hohe Zugspannungen. Diese können durch parallel zum Stringer in den Hautfeldsockel eingelassene Zugentlastungselemente reduziert werden. In ihrer bevorzugten Ausführungsform bestehen sie aus Drähten aus höchstfesten Stahl-, Titan-

oder Ni-Werkstoffen. Ihre positive Wirkung hinsichtlich Schadenstoleranz beruht auf zwei Effekten: Zum ersten setzen sie wegen ihres höheren E-Moduls einer Dehnung längs der Drahtachse einen höheren Widerstand entgegen als der sie umgebende Hautwerkstoff oder die Schweißnaht, weshalb sie ihre Umgebung entlasten. Dadurch sinkt die Rissfortschrittsgeschwindigkeit, wenn sich der Riss dem Zugentlastungselement und damit der Schweißnaht nähert. Zum zweiten wird die Restfestigkeit verbessert, weil das Zugentlastungselement auch noch intakt bleibt, nachdem der Riss die Umgebung des Zugentlastungselementes durchschritten hat.




Erfindungsgemäß sind mehrere Ausführungsformen möglich. Entsprechend Fig. 10 können z. B. in einer bevorzugten Ausführungsvariante zwei vieladrig hochfeste Drähte aus einer Inconel-Legierung unmittelbar rechts und links neben den beiden Schweißnähten in den Hautfeldsockel eingewalzt werden. In dieser Anordnung ist der Effekt der Schweißnahtentlastung besonders ausgeprägt. Durch das Einwalzen und die strukturierte Oberfläche des Drahtseiles kommt eine mechanisch ausreichend stark belastbare Verbindung der Zugentlastungselemente mit dem Hautblech zustande.

In einer weiteren Anordnung (siehe Fig. 11) ist das Zugentlastungselement direkt unter dem Hautfeldversteifungssockel eingewalzt. Bei dieser Ausführungsform lässt sich das Einbringen des Zugentlastungselementes besonders günstig mit der umformtechnischen Erzeugung des Hautfeldversteifungssockels koppeln.

Beispiel 4:

Das in den Fig. 5 bis 7 näher dargestellte Ausführungsbeispiel ist für besonders hohe Anforderungen an die Schadenstoleranz ausgelegt.



Diese Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass sich in dem durch die beiden Schenkel (5, 6) und dem Hautfeldversteifungssockel (13) gebildeten Hohlraum ein Verstärkungselement (17) aus einem im Vergleich zum Haut- und Versteifungselementwerkstoff höheren E-Modul befindet. Im Ausführungsbeispiel besteht das Verstärkungselement aus der Titanlegierung Ti6Al4V. Der E-Modul beträgt 110 GPa im Vergleich zur verwendeten Al-Legierung mit 71 GPa. Wie in Fig. 5 angegeben, hat das Verstärkungselement den Querschnitt eines gleichschenkligen Dreiecks mit einer abgerundeten Spitze. In die Oberfläche des Verstärkungselementes (17) ist durch Rollieren eine Anordnung sich kreuzender Rillen eingepreßt.

Zur Realisierung der Anordnung werden die gleichen Abmaße wie im Ausführungsbeispiel 2 gewählt. Die Abmaße des Verstärkungselementes (17) betragen demnach: Sockelbreite: $b_v = 9,2 \text{ mm}$, Höhe: $h_v = 10,4 \text{ mm}$.

Die Verfahrensschritte werden ebenfalls analog dem Ausführungsbeispiel 2 gewählt. Zusätzlich wird nach dem Strangpressen des Stringers (2) das Verstärkungselement (17) eingewalzt.

Der besondere Vorteil dieser Lösungsvariante mit einem Verstärkungselement in unmittelbarer Nähe beider Schweißnähte liegt darin, dass bei einer Belastung des Hautfeldes in Richtung der Stringerlängsachse die Dehnung in unmittelbarer Schweißnahtnähe durch die infolge des größeren E-Moduls geringere Dehnung des Verstärkungselementes und der form- und / oder kraftschlüssigen Verbindung zum Stringer reduziert wird. Das wirkt sich als Verringerung der Längszugspannungen in der Schweißnaht aus. Eine Abschätzung unter den o. a. geometrischen Parametern ergibt etwa eine Spannungsabminderung in Schweißnahtnähe von ca. 6 %. Wegen der starken Abhängigkeit der Rissfortschrittsgeschwindigkeit von der Hautspannung im kritischen Spannungsbereich von 95 MPa resultiert daraus eine deutliche Lebensdauerverlängerung.

Des weiteren wird trotz der Anbringung von Durchbrüchen (15', 15'') in den Schenkeln (5, 6) der Stringer (2) die Steifigkeit der Stringer gegenüber dem Stand der Technik nicht reduziert, wodurch die Rissstoppfunktion ohne andere nachteilige Folgen, wie Verringerung der Steifigkeit des Hautfeldes oder geringere Stützfunktion der Stringer, möglich wird.

Infolge seiner höheren Anrissdauerfestigkeit ist das Verstärkungselement (17) auch noch intakt, wenn der Riss beide Schweißnähte durchquert hat. Das reduziert, auch nachdem der Stringer später gerissen ist, temporär die Rissfortschrittsgeschwindigkeit. Mit zunehmendem Risswachstum findet eine Lastumlagerung auf das Verstärkungselement (17) des gerissenen Stringers statt, bis sich schließlich entlang des Stringers fortschreitend, die kraft- und / oder formschlüssige Verbindung zum Stringer löst und das Verstärkungselement unter Energieverbrauch aus dem Hohlraum herausgezogen wird. Durch dieses differenzielle Versagen wird die Restfestigkeit erhöht und die Schadensentwicklung vor dem Bruch weniger katastrophal.

In der in Fig. 6 dargestellten Variante ist das Verstärkungselement (17) als Rohr ausgeführt. Fig. 7 stellt eine Variante vor, bei der das Verstärkungselement (17) vor dem Schweißen in das Hautblech (1) eingewalzt wird. Bei dieser Variante ist die Dehnungsbehinderung der Schweißnaht durch das Verstärkungselement besonders stark ausgeprägt.

Wegen der Entlastung der Schweißnaht von Biegebeanspruchung durch die zwischenklige Ausführung der Stringer (2) und der zusätzlichen lokal spannungsmindernden Wirkung des Verstärkungselementes (17) kann ohne schädliche Auswirkung auch der Stringerkopf (12) in einer größeren Dicke ausgeführt werden (siehe Fig. 8). Das führt zu einer besonders steifen Rumpfschale. Für diesen Fall kann alternativ auch der Abstand der


Stringer vergrößert werden. Für das Erreichen größerer Stringerabstände kann es sich als günstig erweisen, in Abständen c vom Stringer (2) oder Spant (2) zusätzliche Hautfeldstege (19) im Hautfeld vorzusehen. Diese lassen sich besonders einfach durch chemisches Fräsen erzeugen.

Beispiel 5:

In einigen Anwendungsfällen müssen die Versteifungselemente (2) sowohl in ihrer Ausführungsform als Spante wie auch als Stringer noch zusätzliche Anbauteile, Lastaufnahmelemente oder eine Innenhaut aufnehmen. Für diese Anwendungen kann es vorteilhaft sein, ohne Verletzung des Erfindungsgedankens, das Versteifungselement als gestürztes U-Profil auszuführen. Fig. 9 zeigt eine geeignete Ausführungsform. Dabei werden die beiden Schenkel (5', 6') bis zum Kopf (12') des Versteifungselementes (2) verlängert. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass der Hautfeldversteifungssockel (13', 13'') zur weiteren Gewichtseinsparung geteilt ausgeführt werden kann.

Bezugszeichenliste

- 1 - Hautblech, Hautfeld
- 2 - Versteifungselemente, Stringer, Spante
- 3 - Fuß des Versteifungselementes, Stringerfuß, Spantfuß
- 4 - Steg des Versteifungselementes, Stringersteg, Spantsteg
- 5 - Schenkel 1
- 5' - Schenkel 1, falls Versteifungselement als U-Profil ausgeführt ist
- 6 - Schenkel 2
- 6' - Schenkel 2, falls Versteifungselement als U-Profil ausgeführt ist
- 7 - Fügezone 1
- 8 - Fügezone 2
- 9 - Anschlussstelle der Fügezone 1, Fügefläche 1
- 10 - Anschlussstelle der Fügezone 2, Fügefläche 2
- 11 - Aufdickung, Hautfeldsockel
- 12 - Kopf des Versteifungselementes, Stringerkopf, Spantkopf
- 12' - Kopf des Versteifungselementes, falls das Versteifungselement als U-Profil ausgeführt ist
- 13 - Hautfeldversteifungssockel
- 13' - } Hautfeldversteifungssockel, falls das Versteifungselement
- 13'' - } als U-Profil ausgeführt ist

- 14 - Verzweigungspunkt der beiden Schenkel 5 und 6
 - 15' - Durchbrüche im Schenkel 1 des Versteifungselementes
 - 15'' - Durchbrüche im Schenkel 2 des Versteifungselementes
 - 16 -  Außenseiten der Hautfeldversteifungssockel 13, 13', 13''
 - 16' -
 - 16'' -
 - 17 - Verstärkungselement
 - 18 - Aussparung des Hautfeldversteifungssockels zur Aufnahme des Verstärkungselementes
 - 19 - Hautfeldsteg
 - 20 - Durchbruch im Steg des Versteifungselementes
 - 21 - Laserstrahlachse
 - 22 - Zugentlastungselement
-
- a - Abstand der Durchbrüche 15' bzw. 15'' in den Schenkeln 1 und 2
 - a' - Abstand der Durchbrüche 20 im Steg 4
 - b_{HS} - Breite des Hautfeldsockels 11
 - b_{rs} - Breite des Hautfeldversteifungssockels, Abstand der beiden Schenkel 5 und 6 auf dem Hautfeldsockel
 - b_s - Breite des Kopfes des Versteifungselementes, Stringerkopfbreite
 - b_{s0} - Schenkeldicke in der Nähe der Verzweigung des Fußes des Versteifungselementes
 - b_v - Sockelbreite des Verstärkungselementes 17

- c - Abstand des Hautfeldsteges von der Mittellinie des Versteifungselementes
- d_H - Hautfelddicke
- d_{Hs} - Dicke des Hautfeldes einschließlich Hautfeldsockel
- d_{Hv} - Dicke des Hautfeldes einschließlich Hautfeldversteifungssockel
- d_s - Dicke des Versteifungselementes, Stringerdicke, Spantdicke
- F - Kraft auf Stringer infolge Biegemoment
- F_v - Kraft am Verzweigungspunkt infolge Biegemoment
- h_s - Höhe des Versteifungselementes, Stringerhöhe, Spanthöhe
- h_v - Höhe des Verstärkungselementes 17
- M - Biegemoment auf Stringer
- R - Krümmungsradius des Hautfeldes
- $R_1; R_2$ - Spannungsabminderungsfaktoren in der Schweißnaht
- r - Krümmungsradius des Überganges zwischen dem Steg des Versteifungselementes 4 und den beiden Schenkeln 5, 6
- s_s - Schenkelhöhe
- t_s - Schenkeldicke in der Ebene der Fügezone, Anbindungstiefe der Schweißnaht
- α - Winkel zwischen den beiden Schenkeln 5 und 6
- α_{KB} - Kerbformzahl für Biegebelastung
- α_{KZ} - Kerbformzahl für Zugbelastung
- α'_{KB} - Kerbformzahl für Biegebelastung am Ort der Schenkelverzweigung
- β - Winkel zwischen der Fügefläche der Fügezone 7 bzw. 8 und Hautfeld 1
- γ - Winkel zwischen Laserstrahlachse 21 und Hautblech

$\sigma_{\text{Beff}}^{(a,b,c)}$ - effektive auf die Schweißnaht wirkende Biegespannung im Ausführungsfall (a, b, c)

$\sigma_{\text{Zeff}}^{(a,b,c)}$ - effektive auf die Schweißnaht wirkende Zugspannung im Ausführungsfall (a, b, c)

$\sigma_{\text{Beff}}^{(a,b,c)0}$ - effektive auf den Übergang zwischen dem Steg 4 des Versteifungselementes und den beiden Schenkel 5, 6 wirkende Biegespannung im Ausführungsfall (a, b, c)

PATENTANSPRÜCHE

1. Leichtbau-Strukturbauteil insbesondere für Flugzeuge, bestehend aus mindestens einem Hautblech (1) und darauf längs oder quer oder längs und quer angeordneten Versteifungselementen (2), die jeweils mit ihrem Fuß (3) stoffschlüssig vollständig oder zumindest teilweise mit dem Hautblech (1) verbunden sind, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Steg (4) des Versteifungselementes (2) auf seiner dem Hautblech (1) zugewandten Seite aus zwei Schenkeln (5; 5', 6, 6') besteht, die beide mittels zweier getrennter Fügezonen (7, 8) stoffschlüssig mit dem Hautfeld (1) verbunden sind.
2. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Hautfeld (1) im Bereich der Anschlussstellen (9, 10) der Fügezonen (7, 8) eine Aufdickung (11) aufweist.
3. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Versteifungselemente (2) als längs verlaufende Stringer ausgebildet sind.
4. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Versteifungselemente (2) als in Umfangsrichtung verlaufende Spante ausgebildet sind.
5. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die getrennten Fügezonen (7, 8) Laserstrahlschweißzonen sind.
6. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die getrennten Fügezonen (7, 8) Rührreischweißzonen sind.
7. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die getrennten Fügezonen (7, 8) geklebte Fügezonen sind.
8. Leichtbau-Strukturbauteil nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich zwischen den Innenflächen der Schenkel (5, 6) ein Hautfeldversteifungssockel (13) befindet, dessen Dicke d_{HV} größer ist, als die Dicke d_{HS} des Hautfeldsockels (11) und dessen Seitenflächen (16) so gestaltet sind, dass sie an den Innenflächen der Schenkel (5, 6) anliegen und die beiden Fügezonen 1 und 2 (7,8)

so ausgeführt sind, dass sie bis an in die Seitenflächen (16) des Hautfeldversteifungssockels (13) ranreichen.

9. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Schenkel (5, 6) um einen Gesamtwinkel α abgewinkelt sind, so dass die Innenflächen der beiden Schenkel (5, 6) und die Oberfläche des Hautversteifungssockels (13) ein gleichschenkliges Dreieck bilden und der Gesamtwinkel α im Bereich $7^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ liegt.

10. Leichtbau-Strukturbauteil nach den Ansprüchen 8 und 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** für die Abmaße des Versteifungselementes (2) folgende Relationen gelten:

- a) für das Verhältnis zwischen der Schenkeldicke in der Ebene der Fügezone t_s und der Dicke des Versteifungselementes d_s

$$0,5 \leq t_s/d_s \leq 1,8$$

- b) für das Verhältnis zwischen Schenkellänge s_s und der Höhe des Versteifungselementes h_s

$$0,15 \leq s_s/h_s \leq 0,7.$$

- c) für das Verhältnis Schenkeldicke in der Nähe der Verzweigung der beiden Schenkel der Versteifungselemente b_{so} und der Schenkeldicke in der Ebene der Fügezone t_s

$$0,28 \leq b_{so}/t_s \leq 1.$$

- d) für den Winkel β zwischen dem Hautfeld und der Fügefläche der Fügezone

$$0^\circ \leq \beta \leq 25^\circ.$$

11. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Schenkel (5, 6) um einen Gesamtwinkel $\alpha = 180^\circ$ abgewinkelt sind, so dass die Innenflächen der beiden Schenkel (5, 6) auf der Oberfläche des Hautfeldsockels (11) aufliegen.

12. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Versteifungselement (2) aus einem U-Profil gebildet wird,

wobei die beiden Schenkel (5'; 6') sich direkt bis zum Kopf (12') des Versteifungselementes erstrecken.

13. Leichtbau-Strukturbauteil nach den Ansprüchen 1 bis 4 und 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kopf (12') des Versteifungselementes (2) an beiden Seiten über die parallel verlaufenden Schenkel (5', 6') des U-Profils hinausragt.
14. Leichtbau-Strukturbauteil nach den Ansprüchen 1 bis 4 und 12 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden über die Schenkel (5', 6') hinausreichenden Bereiche des Kopfes (12') des Versteifungselementes (2) je ein in Richtung Hautblech (1) zeigenden Randbereich aufweisen.
15. Leichtbau-Strukturbauteil nach den Ansprüchen 1 bis 4 und 12 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hautfeldverstärkungssockel (13', 13'') geteilt ausgeführt ist und dass die beiden seitlichen Außenflächen des Hautfeldverstärkungssockels (16', 16'') an den Innenflächen der Schenkel (5', 6') anliegen.
16. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 1 oder 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Fügeflächen (9, 10) und die Außenseiten (16, 16', 16'') der Hautfeldverstärkungssockel (13) oder (13', 13'') eine spanend bearbeitete Oberfläche aufweisen.
17. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich in den beiden Schenkeln (5, 6) Durchbrüche (15, 15') befinden, die in Abständen a entlang der Schenkel (5, 6) angeordnet sind.
18. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Abstand der Berandung der Durchbrüche (15, 15') zu den Fügeflächen (9, 10) größer ist, als das Anderthalbfache der Schenkeldicke t_s in der Ebene der Fügezone.
19. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchbrüche (15') und die Durchbrüche (15'') um jeweils den Abstand $a / 2$ versetzt angeordnet sind.
20. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchbrüche (15', 15'') eine Kreiszylinderform aufweisen.

21. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchbrüche (15', 15'') die Form von gleichseitigen oder nahezu gleichseitigen Dreiecken mit abgerundeten Ecken aufweisen, wobei die Durchbrüche (15, 15') entlang der Schenkel (5, 6) oder (5', 6') so angeordnet sind, dass die Spitzen der Dreiecke abwechselnd in Richtung Hautfeld (1) und in Richtung Kopf des Versteifungselementes (12) weisen.
22. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** auf beide Außenflächen der beiden Schenkel des Versteifungselementes (5, 6) oder (5', 6') ein Doppler aus einem schadenstoleranten faserverstärkten Laminat angebracht ist.
23. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 22, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich innerhalb des Hautfeldsockels (11), symmetrisch zum Steg (4) des Versteifungselementes (2) und in der Nähe der Fügezonen (7, 8) ein bis fünf Zugentlastungselemente (22) befinden, die aus einem Werkstoff mit deutlich höherem Elastizitätsmodul und höherer Dauerschwingfestigkeit als der Werkstoff des Hautbleches (2) bestehen.
24. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zugentlastungselemente (22) aus hochfesten Drahtseilen bestehen.
25. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich ein Zugentlastungselement direkt unter dem Hautfeldversteifungssockel (13) befindet.
26. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hautfeldversteifungssockel (13) aus dem beim Einwalzen des Zugentlastungselementes (22) zweckentsprechend umgeformten Material besteht.
27. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich auf dem Hautfeld (1) parallel oder senkrecht oder senkrecht und parallel zu den Verstärkungselementen (2) Hautfeldstege (19) befinden.
28. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 1 bis 27, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Höhe der Hautfeldstege (19) der Höhe der Hautfeldversteifungssockel (13) entspricht und der Abstand der Versteifungselemente

(2) auf dem Hautsockel (1) ein ganzzahliges Vielfaches des Abstandes c der Hautfeldstege (19) ist.

29. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 28, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kopf des Versteifungselementes (12) symmetrisch ausgebildet und mittig auf dem Steg des Versteifungselementes (4) angeordnet ist.
30. Leichtbau-Strukturbauteil insbesondere für Flugzeuge, bestehend aus mindestens einem Hautblech (1) und darauf längs oder quer oder längs und quer angeordneten Versteifungselementen (2), die jeweils mit ihrem Fuß (3) stoffschlüssig vollständig oder zumindest teilweise mit dem Hautblech (1) verbunden sind, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Steg (4) des Versteifungselementes (2) auf seiner dem Hautblech (1) zugewandten Seite aus zwei Schenkeln (5, 6) besteht, die beide mittels zweier getrennter Fügezonen (7, 8) stoffschlüssig mit dem Hautfeld (1) verbunden sind, das Hautfeld (1) im Bereich der Anschlussstellen (9, 10) der Fügezonen (7; 8) eine Auf-dickung (11) aufweist und sich in dem durch die beiden Schenkel (5, 6) und dem Hautfeldversteifungssockel (13) gebildeten Hohlraum ein Verstärkungselement (17) befindet, das aus einem hochfesten Werkstoff mit einem Elastizitätsmodul besteht, der größer ist als der Elastizitätsmodul der Werkstoffe des Hautbleches (1) oder der Versteifungselemente (2) und das Verstärkungselement (17) kraft- und / oder formschlüssig mit den beiden Schenkeln (5, 6) und / oder dem Hautfeldversteifungssockel (13) verbunden ist.
31. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Versteifungselemente (2) als längsverlaufende Stringer ausgebildet sind.
32. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Versteifungselemente (2) als in Umfangsrichtung verlaufende Spante ausgebildet sind.
33. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der vorangegangenen Ansprüche 30 bis 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** die getrennten Fügezonen (7, 8) Laserstrahlschweißzonen sind.
34. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der vorangegangenen Ansprüche 30 bis 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** die getrennten Fügezonen (7, 8) Rührreibschweißzonen sind.

35. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der vorangegangenen Ansprüche 30 bis 32, **dadurch gekennzeichnet, dass** die getrennten Fügezonen (7, 8) geklebte Fügezonen sind.
36. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 30 bis 35, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Fügeflächen (9, 10) und die Außenseiten (16) des Hautfeldversteifungssockels (13) eine spanend bearbeitete Oberfläche aufweisen.
37. Leichtbau-Strukturbauteil nach mindestens einem der Ansprüche 30 bis 36, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein kombinierter Kraft- und Formschluss realisiert ist, indem die Oberfläche des Verstärkungselementes (17) eine Aufrauung oder eine Oberflächenprofilierung aufweist, deren Abdruck sich auf den beiden Innenflächen der beiden Schenkel (5, 6) und / oder auf der Oberfläche des Hautfeldverstärkungssockels (13) befindet.
38. Leichtbau-Strukturbauteil nach mindestens einem der Ansprüche 30 bis 37, **dadurch gekennzeichnet, dass** der durch die beiden Schenkel (5, 6) und den Hautfeldversteifungssockel (13) gebildete Hohlraum und der Querschnitt des Verstärkungselementes (17) ein gleiches gleichschenkliges Dreieck mit einer abgerundeten Spitze bilden.
39. Leichtbau-Strukturbauteil nach mindestens einem der Ansprüche 30 bis 37, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verstärkungselement (17) als Draht oder Rohr ausgebildet ist, der Hautfeldversteifungssockel (13) als Kreisabschnitt mit dem Draht- oder Rohrdurchmesser ausgeführt ist und die Verzweigung der beiden Schenkel (5, 6) am Fuß des Versteifungselementes (2) so ausgebildet werden, dass sie den Draht oder das Rohr mit einem Umschlingungswinkel von ca. 180° umschließen und die beiden Schenkel (5; 6) parallel zueinander liegen, wobei der Abstand ihrer beiden Innenflächen dem Durchmesser des Drahtes oder Rohres entspricht.
40. Leichtbau-Strukturbauteil nach mindestens einem der Ansprüche 30 bis 37, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Hautfeldversteifungssockel (13) eine Aussparung (18) zur Aufnahme des Verstärkungselementes (17) enthält.
41. Leichtbau-Strukturbauteil nach mindestens einem der Ansprüche 30 bis 40, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Steg (4) oder die Schenkel (5, 6) des Versteifungselementes (2) Durchbrüche (20, 15', 15'') aufweisen, die in Abständen a entlang des Steges (4) oder entlang der Schenkel (5, 6) angeordnet sind.

42. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 41, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchbrüche (20, 15', 15'') kreisförmig ausgebildet sind.
43. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 41, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchbrüche (20, 15', 15'') die Form von gleichseitigen oder nahezu gleichseitigen Dreiecken mit abgerundeten Ecken aufweisen, wobei die Dreiecke entlang des Steges (4) oder der beiden Schenkel (5, 6) so angeordnet sind, dass eine Spitze der Dreiecke abwechselnd in Richtung Hautfeld (1) und in Richtung Kopf des Versteifungselementes (12) weist.
44. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 41 bis 43, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Durchbrüche (15' und 15'') um jeweils den Abstand $a/2$ versetzt angeordnet sind.
45. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der vorangegangenen Ansprüche 30 bis 44, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich innerhalb des Hautfeldsockels (11) symmetrisch zum Steg (4) des Versteifungselementes (2) und in der Nähe der Fügezonen (7, 8) zwei oder vier Zugentlastungselemente befinden, die aus einem Werkstoff mit deutlich höherem Elastizitätsmodul und höherer Dauerschwingfestigkeit als der Werkstoff des Hautbleches (2) bestehen.
46. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem der Ansprüche 30 bis 45, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zugentlastungselemente (22) aus hochfesten Drahtseilen bestehen.
47. Leichtbau-Strukturbauteil nach den Ansprüchen 1 oder 30 und/ oder einem oder mehreren der jeweils nachfolgenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich auf dem Hautfeld (1) parallel oder senkrecht oder parallel und senkrecht zu den Verstärkungselementen (2) Hautfeldstege (19) befinden.
48. Leichtbau-Strukturbauteil nach Anspruch 47, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Höhe der Hautfeldstege (19) der Höhe der Hautfeldversteifungssockel (13) entspricht und der Abstand der Versteifungselemente (2) auf dem Hautblech (1) ein ganzzahliges Vielfaches des Abstandes c der Hautfeldstege (19) ist.
49. Leichtbau-Strukturbauteil nach einem oder mehreren der Ansprüche 30 bis 48, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Kopf des Versteifungselementes (12) symmetrisch ausgeführt und mittig auf dem Steg (4) des Versteifungselementes (2) angeordnet ist.

50. Verfahren zur Herstellung eines Leichtbau-Strukturbauteiles, insbesondere für Flugzeuge, wie sie in mindestens einem der vorangegangenen Ansprüche 1 bis 49 beschrieben sind, mit folgenden Schritten:
- a) chemisches oder mechanisches Fräsen zur Herausarbeitung der Aufdickung (11) des Hautbleches (1),
 - b) Strangpressen der Versteifungselemente (2),
 - c) Spannen des Hautfeldes (1),
 - d) symmetrisches Positionieren des Versteifungselementes (2) auf der Aufdickung (11) des Hautbleches (1)
 - e) Spannen des Versteifungselementes (2) zur Realisierung einer planen Anlage der Fügeflächen 1 und 2 (9, 10),
 - f) Fügen des Versteifungselementes (2) mit dem Hautblech (1) mittels zweier getrennter Fügezonen unter zumindest lokaler mechanischer Spannung.
51. Verfahren nach Anspruch 50, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Fügen durch ein Laserstrahlschweißen erfolgt.
52. Verfahren nach Anspruch 51, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Laserstrahlschweißen der Laserstrahlfokus dergestalt geformt wird, dass er in Vorschubrichtung gestreckt oder in zwei Teilstrahlen aufgeteilt ist.
53. Verfahren nach Anspruch 50, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Fügen durch ein Rührreibschweißen vorgenommen wird.
54. Verfahren nach Anspruch 50, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Fügen durch ein Kleben erfolgt.
55. Verfahren nach einem der Ansprüche 50 bis 54, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Fügen der beiden Schenkeln (5, 6) bzw. (5', 6') des Versteifungselementes (2) mit dem Hautblech (1) beidseitig gleichzeitig erfolgt.
56. Verfahren nach einem der Ansprüche 50 bis 54, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Schenkel (5, 6) bzw. (5', 6') des Versteifungselementes (2) einseitig nacheinander mit dem Hautblech (1) gefügt werden.

57. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 50 bis 56, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden Schenkel (5, 6) bzw. (5', 6') mit Hilfe und während des Strangpressens ausgebildet werden.
58. Verfahren nach Anspruch 57, **dadurch gekennzeichnet, dass** für den Fall, dass das Versteifungselement (2) ein Spant ist, der Spant (2) mit einem solchen Radius stranggepresst wird, dass der Radius, den die beiden Unterseiten der Schenkel (5, 6) bzw. (5', 6') aufweisen, dem Radius der Innenseite des Hautfeldsockels (11) entspricht.
59. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 50 bis 56, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Versteifungselement (2) konventionell stranggepresst wird und die beiden Schenkel (5, 6) durch ein nachfolgendes Spalten mittels Drückwalzen erzeugt wird.
60. Verfahren zur Herstellung eines Leichtbau-Strukturbauteiles, wie es in mindestens einem der Ansprüche 30 bis 49 beschrieben ist, nach mindestens einem der Ansprüche 50 bis 59, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verstärkungselement (17) vor der Positionierung des Versteifungselementes (2) auf dem Hautblech (1) zwischen die Schenkel (5, 6) des Versteifungselementes (2) oder in die Aussparung (18) des Hautfeldversteifungssockels (13) eingebracht wird und durch eine mechanische Umformung form- und / oder kraftschlüssig mit dem Versteifungselement (2) oder dem Hautfeldversteifungssockel (13) verbunden wird.
61. Verfahren nach Anspruch 60, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mechanische Umformung durch ein Einwalzen erfolgt.
62. Verfahren nach Anspruch 60, **dadurch gekennzeichnet, dass** die kraft- und / oder formschlüssige Verbindung zwischen Versteifungselement (2) und Verstärkungselement (17) durch Koextrudieren erzeugt wird.
63. Verfahren nach Anspruch 60, **dadurch gekennzeichnet, dass** die mechanische Umformung zur Erzeugung der kraft- und / oder formschlüssigen Verbindung zwischen Versteifungselement (2) und Verstärkungselement (17) durch die Spanntechnik direkt vor dem Fügeprozess oder im Vorlauf zum Fügeprozess bewirkt wird.

Zusammenfassung

Die Erfindung bezieht sich auf die füge- und beanspruchungsgerechte Ausgestaltung eines Leichtbau-Strukturbauteiles insbesondere für Flugzeuge und ein Verfahren zu seiner Herstellung.

Aufgabe der Erfindung ist es, das Leichtbau-Strukturbauteil so auszubilden, dass es trotz integraler Ausführung im Überlastungsfall differenziell und sequenziell versagt, dass es zu reduzierten Spannungen und Dehnungen in der Fügezone und deren unmittelbarer Umgebung führt und dass es mit verschiedenen Herstellungsverfahren einfach zu fertigen ist.

Die Erfindung besteht darin, dass die Versteifungselemente auf ihrer dem Hautblech zugewandten Seite aus zwei räumlich getrennten Schenkeln bestehen, die beide mittels zweier getrennter Fügezonen stoffschlüssig mit dem Hautblech verbunden werden. Wesentliche Fortbildungen der Erfindung kommen dadurch zustande, dass zwischen den beiden Schenkeln ein zusätzlicher Hautversteifungssockel und / oder ein Verstärkungselement aus einem Werkstoff mit einem deutlich höheren E-Modul angebracht ist.

Vorschlag für Bild in der Zusammenfassung: Fig. 2

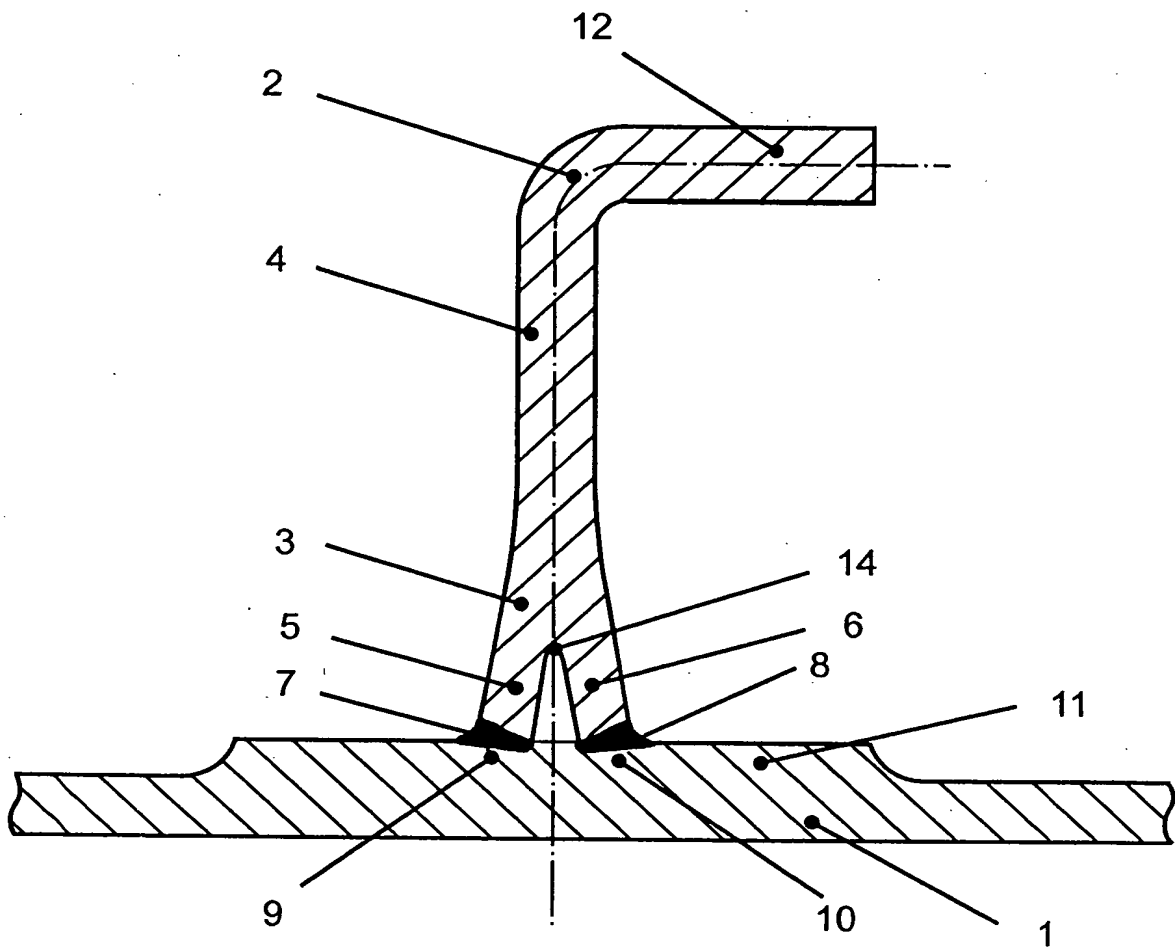
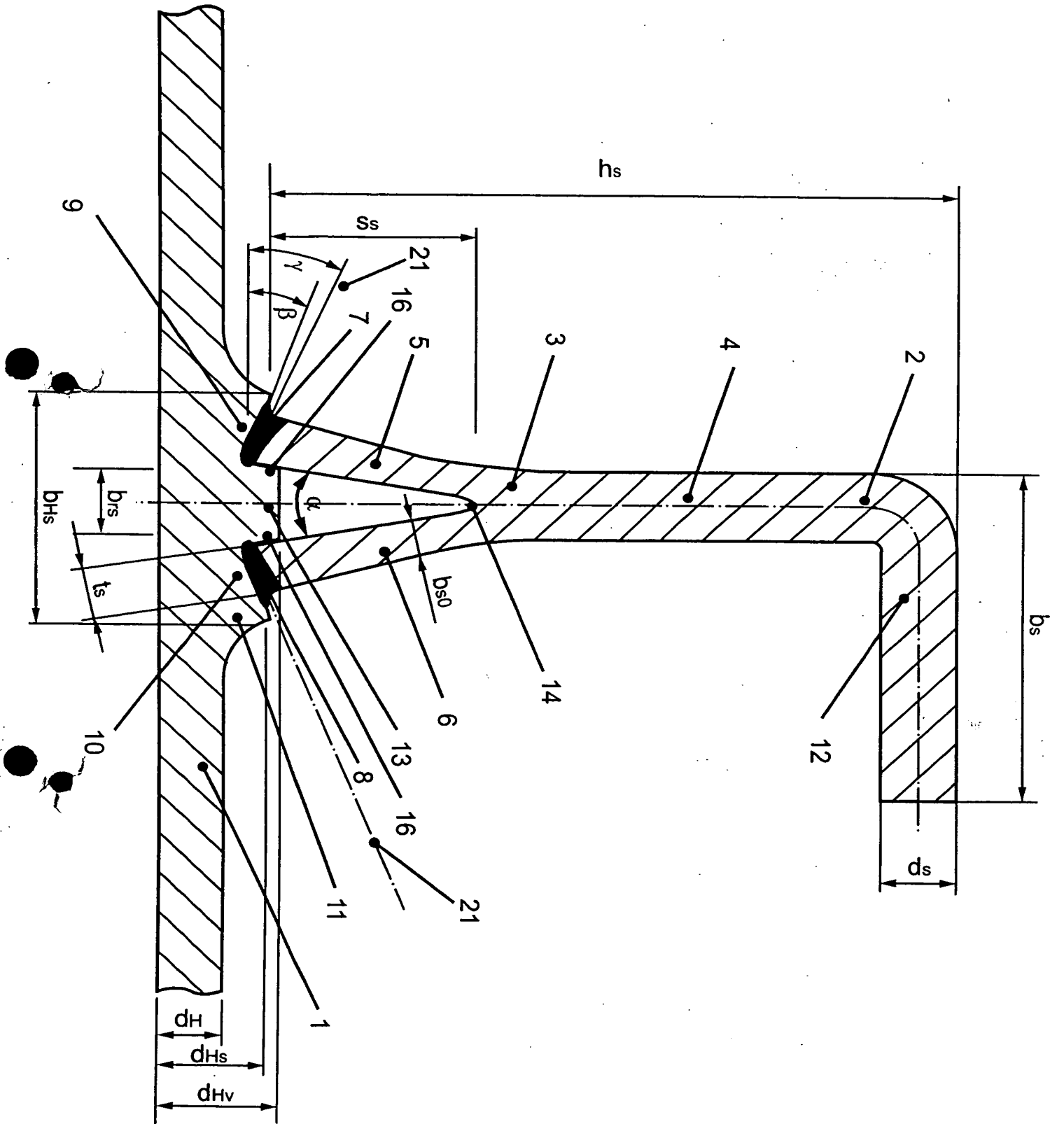


Fig.1

Fig.2



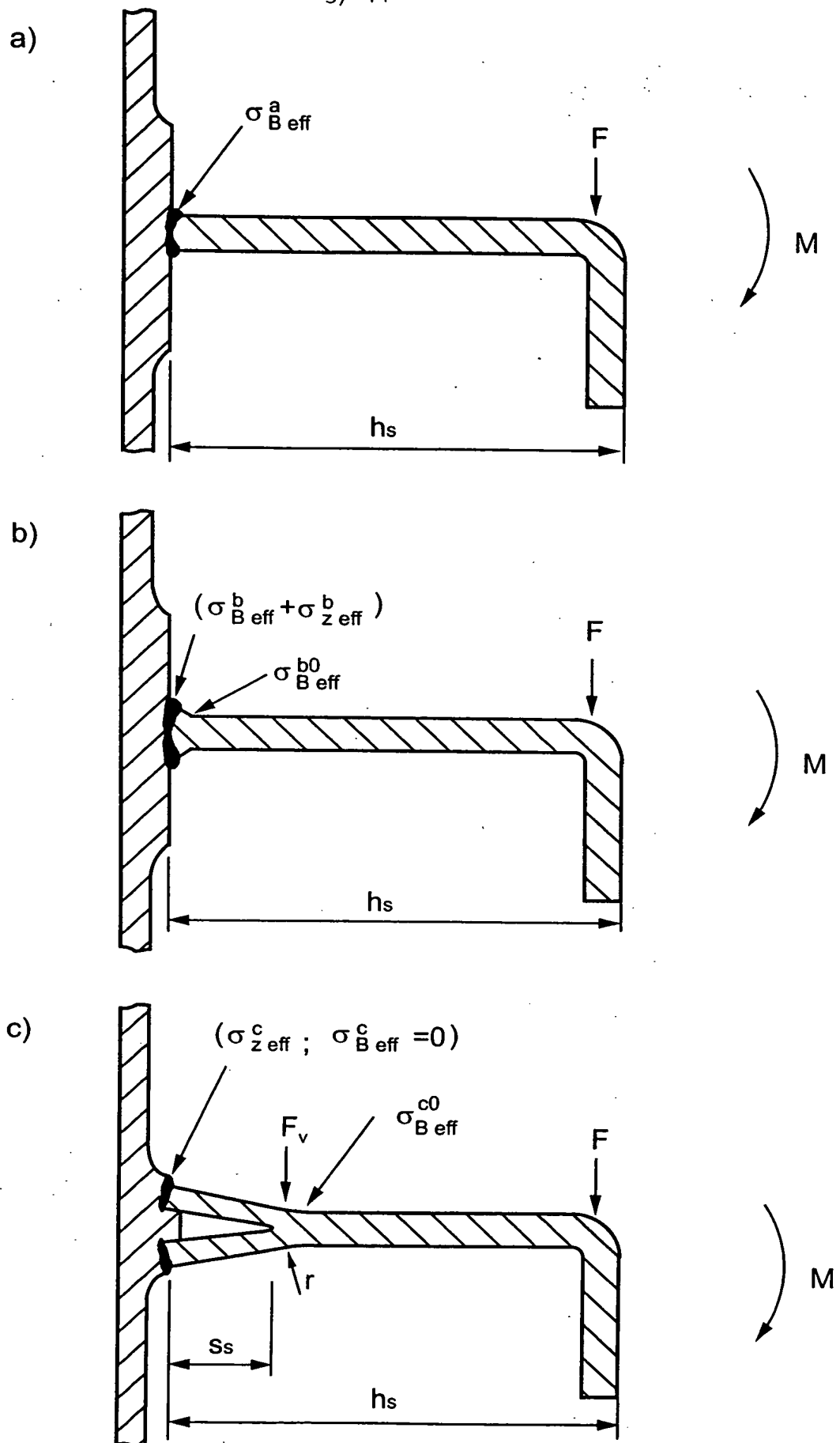


Fig.3

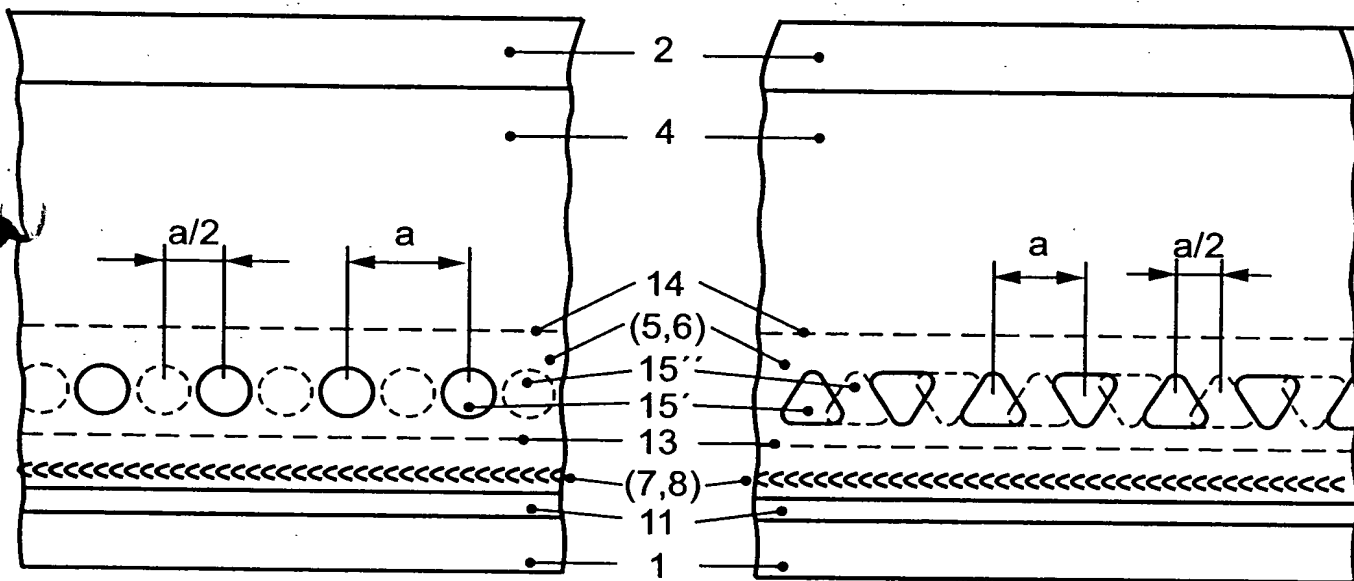
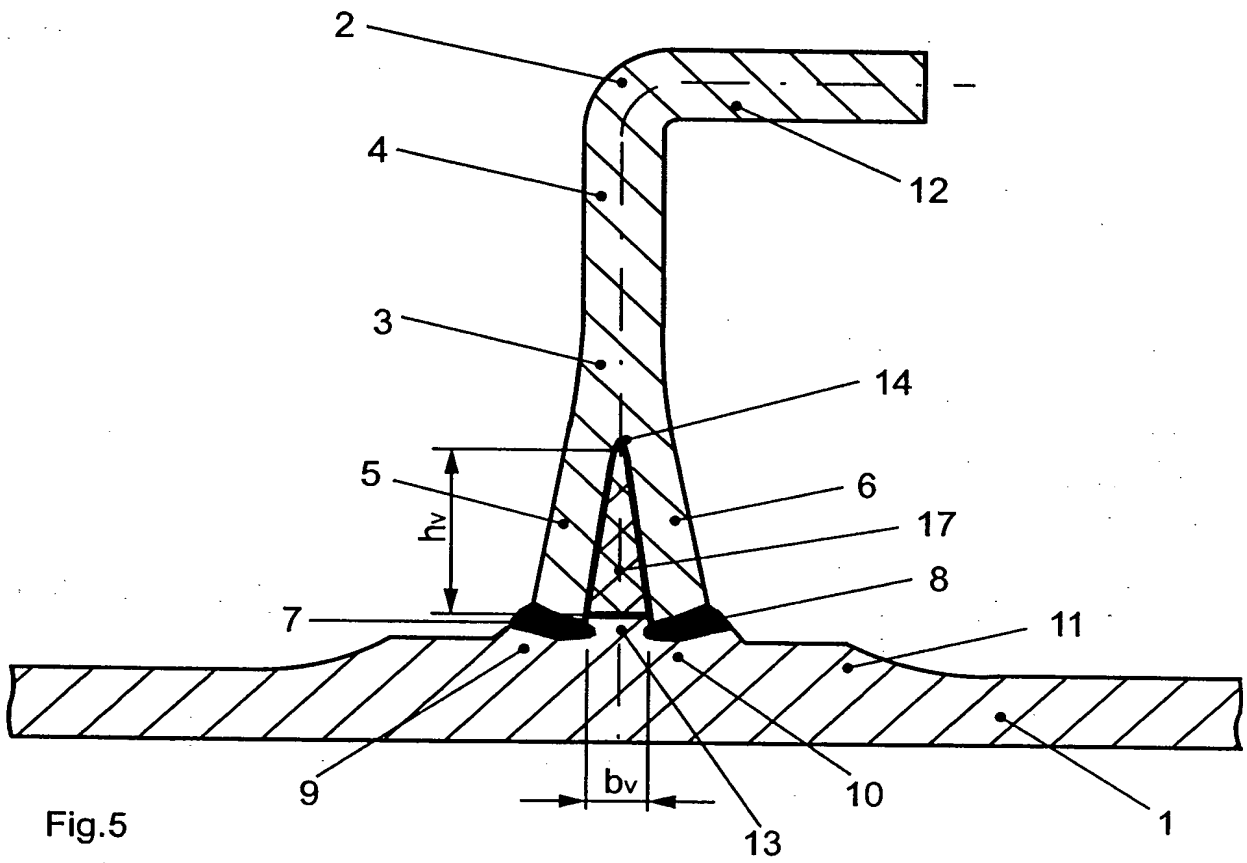


Fig.4a

Fig.4b



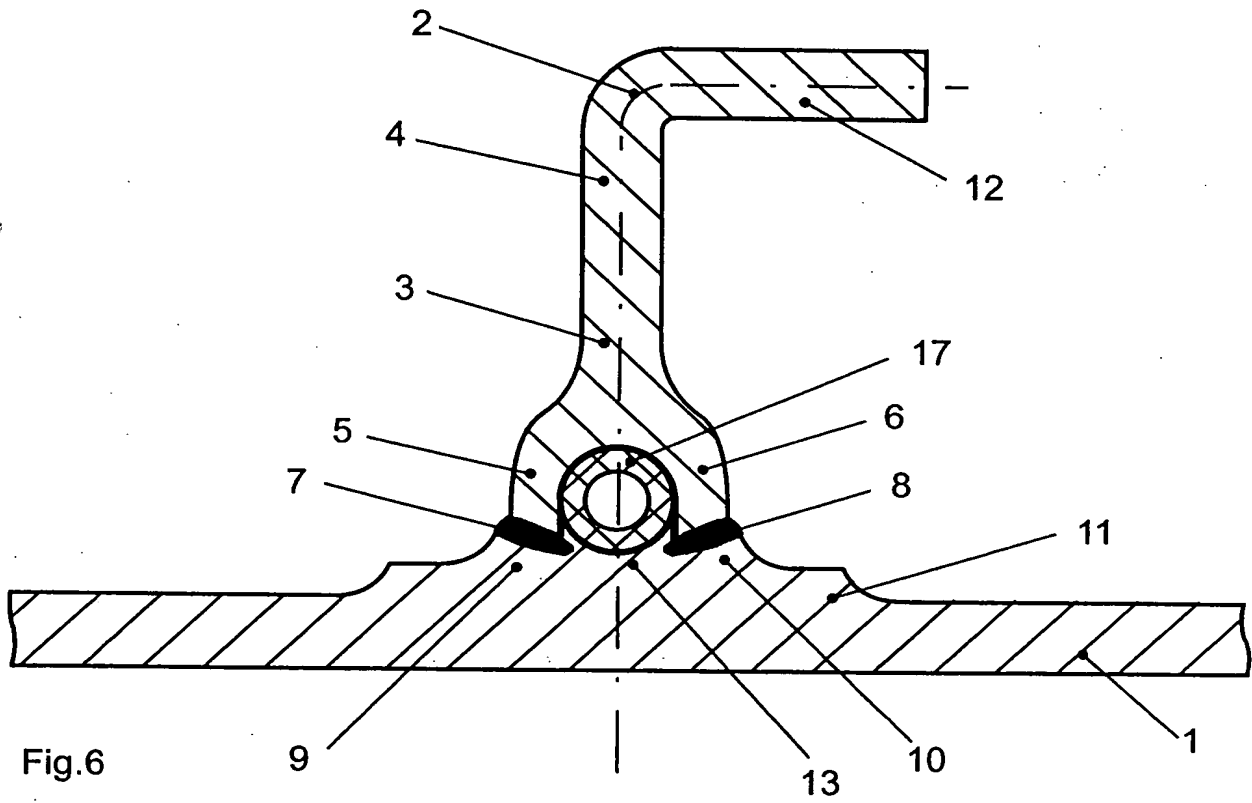


Fig.6

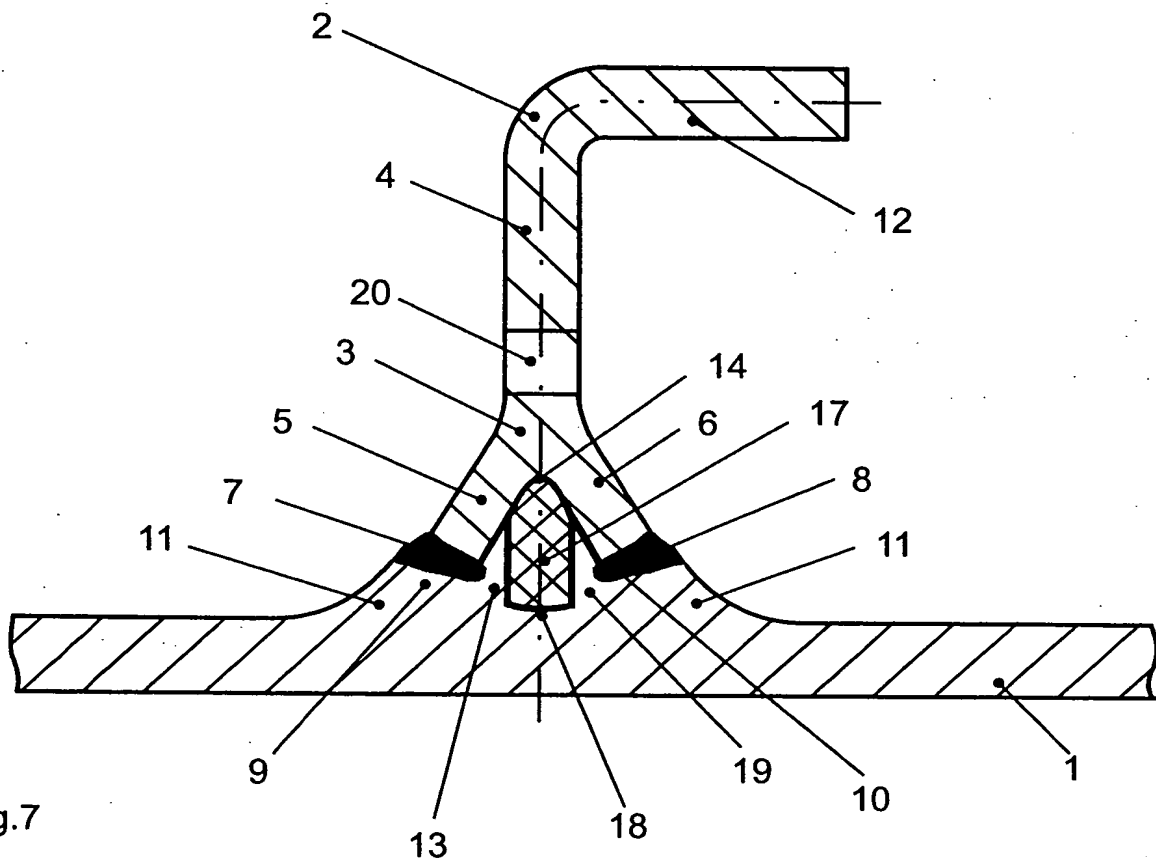


Fig.7

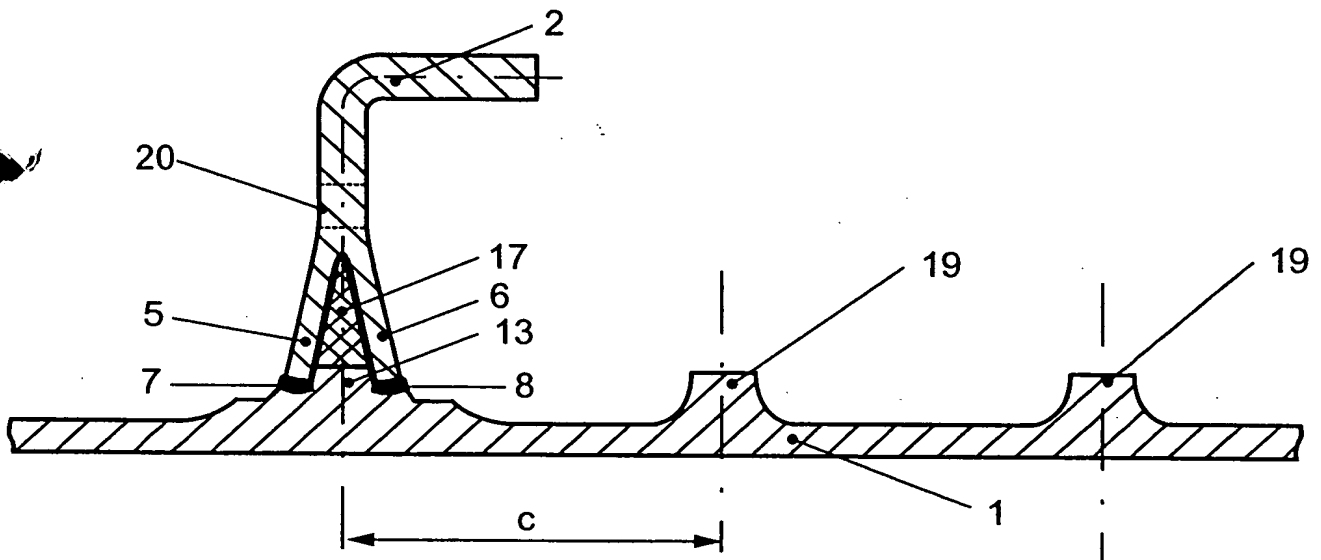


Fig.8

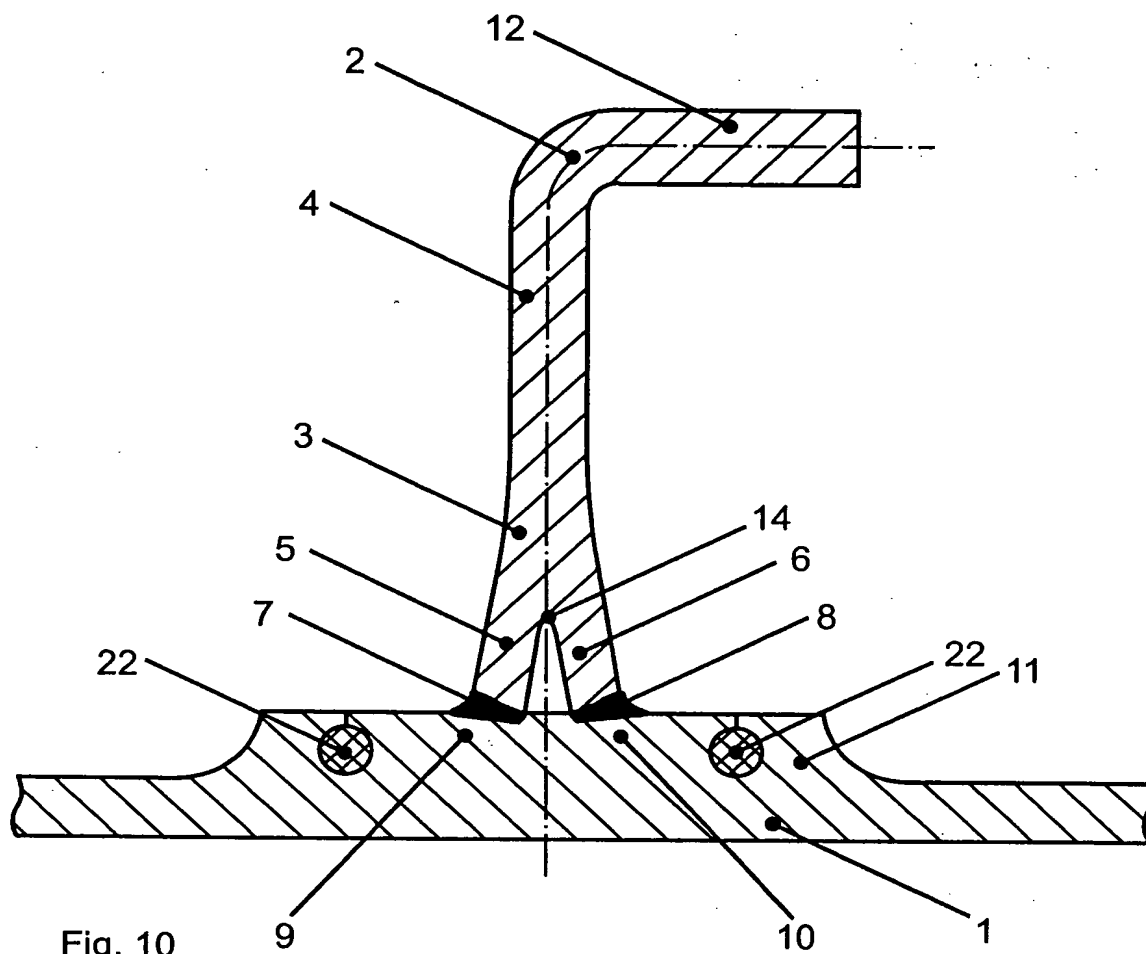


Fig. 10

